



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

“Tratamiento de relaves de cianuración de concentrados refractarios para la recuperación de oro y plata en la zona de Calpa - Arequipa”

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTORES

Hilton Deyvis CHILÓN CHILÓN

Marco Ronmer MEJÍA GARCÍA

ASESOR

Marco Ronmer MEJÍA GARCÍA

Lima, Perú

2018



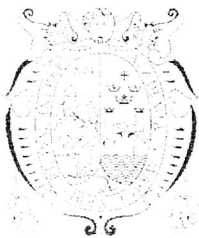
Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Chilón, H. & Mejía, M. (2018). *Tratamiento de relaves de cianuración de concentrados refractarios para la recuperación de oro y plata en la zona de Calpa - Arequipa*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



Universidad Nacional Mayor De San Marcos

Universidad del Perú - Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

"Año del Diálogo y la Reconciliación Nacional"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS MANCOMUNADA PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO

En el Salón de Grados de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, el día lunes 10 de diciembre del año 2018, siendo las 5:00 p.m. en presencia de los señores docentes designados como miembros del Jurado Calificador:

- Mg. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA	Presidente
- Ing. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR	Miembro
- Ing. MANUEL LEONARDO CABRERA SANDOVAL	Miembro

Reunidos para el acto Académico Público de Colación de Tesis mancomunada de don: HILTON DEYVIS CHILÓN CHILÓN, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica quien sustentará la Tesis mancomunada titulada "TRATAMIENTO DE RELAVES DE CIANURACIÓN DE CONCENTRADOS REFRACTARIOS PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA EN LA ZONA DE CALPA-AREQUIPA", para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico.

Los miembros del Jurado, escuchada la colación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

SATISFACCIÓN

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

DIECISEIS (16)

Habiendo sido aprobada la Sustentación de Tesis mancomunada por el Jurado examinador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico a don HILTON DEYVIS CHILÓN CHILÓN

Siendo las 7:00 p.m. horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la sustentación de Tesis.

Ciudad Universitaria, 10 de diciembre 2018

Mg. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente

Ing. MANUEL LEONARDO CABRERA SANDOVAL
Miembro

Ing. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
Miembro

Mg. SÓSIMO ISIDORO FERNÁNDEZ SALINAS
DIRECTOR
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



Myrella M.

CONTENIDO

DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN	viii
NOMENCLATURA	x
LISTA DE TABLAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiv
CAPITULO I	17
INTRODUCCIÓN	17
CAPITULO II	18
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2.1. Descripción del problema	18
2.1.1. El problema fundamental	18
2.2. Justificación de la investigación	19
2.2.1. Justificación tecnológica	19
2.3. Objetivos	19
2.3.1. Objetivo general	19
2.3.2. Objetivos específicos	20
2.4. Hipótesis y variables	20
2.4.1. Hipótesis general	20
2.4.2. Hipótesis específicas	20
2.5. Identificación de variables	21
2.5.1. Las variables a considerarse en la primera etapa de flotación:	21
2.5.2. Las variables a considerarse en la segunda etapa, que es el proceso de biolixiviación:	21
2.5.3. Las variables a considerarse en la tercera etapa, de cianuración:	22
2.6. Operacionalización de variables	23
CAPITULO III	24
MARCO TEÓRICO	24
3.1. Antecedentes	24

3.2. Ubicación de Calpa	26
3.2.1. Ubicación Geográfica	26
3.2.2. Localización Geográfica	26
3.3. Estudio del oro	27
3.3.1. El papel del oro en la historia	27
3.3.2. El oro en la naturaleza	31
3.3.3. Minerales auríferos principales	32
3.3.4. Propiedades físicas del oro	35
3.3.5. Propiedades químicas	38
3.3.6. Propiedades mecánicas	39
3.3.7. Utilidades del oro	40
3.3.8. Producción nacional de oro por regiones	45
3.4. Plata	46
3.4.1. Historia	46
3.4.2. Características	48
3.4.3. Propiedades Físicas y Químicas de la Plata (Ag)	49
3.4.4. Usos	50
3.4.5. Potencial Geológico	53
3.4.6. Producción de plata (Ag)	54
3.5. La flotación	56
3.5.1. Generalidades	56
3.5.2. Etapas de la flotación	59
3.5.3. Flotación diferencial	61
3.5.4. Reactivos utilizados para la flotación de minerales	61
3.5.5. VARIABLES DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE FLOTACIÓN	63
3.5.6. Flotación del oro	65
3.6. Oxidación biológica o lixiviación bacteriana	75
3.6.1. Aspectos microbiológicos:	77
3.6.2. Transferencia de energía en sistemas biológicos	82
3.6.3. Adaptación de bacterias	83

3.6.4. Mecanismos de la biolixiviación:	85
3.6.5. Efecto del medio ambiente	87
3.7. Lixiviación del oro con cianuro o cianuración	93
3.7.1. Química del cianuro en medio acuoso	97
3.7.2. Termodinámica de la cianuración	99
3.7.3. Interferencia de impurezas de los minerales	103
3.7.4. Aditivos aceleradores de la cianuración	103
3.8. Tratamientos de efluentes mineros	105
3.8.1. Procesos de detoxificación de soluciones cianuradas	107
CAPITULO IV	111
METODOLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA	111
4.1. Tipo y diseño de investigación	111
4.2. Unidad de análisis	112
4.3. Población de estudio	112
4.4. Tamaño de muestra	112
4.5. Selección de muestra	112
4.6. Procedimiento metodológico de la investigación	113
4.7. Análisis mineralógico de la investigación	114
4.8. Caracterización mineralógica	115
4.8.1. Distribución volumétrica porcentual	115
4.8.2. Grados de liberación	116
4.8.3. Interpretación de los grados de liberación de los minerales que han intervenido en el análisis modal.	116
CAPITULO V	125
PRUEBAS EXPERIMENTALES	125
5.1. Pruebas de flotación de los relaves de cianuración	125
5.1.1. Condiciones de la prueba	125
5.1.2. Resultados de la flotación para un consumo de 50 g/TM de XANTATO Z11	126
5.1.3. Resultados de la flotación para un consumo de 60 g/TM de XANTATO Z-11	126
5.1.4. Resultados de la flotación para un consumo de 70 g/TM de XANTATO Z-11	127

5.1.5. Resultados de la flotación para un consumo de 80 g/TM de XANTATO Z-11 127	
5.2. Biolixiviación del concentrado de la mejor prueba de flotación, con 70 gr/TM DE Z11	129
5.2.1 Condiciones de la prueba	129
5.2.2. Resultados de la biolixiviación a 5 días	129
5.2.3. Resultados de la biolixiviación a 10 días	130
5.2.4. Resultados de la biolixiviación a 15 días	130
5.2.5. Resultados de la biolixiviación a 20 días	130
5.3. Prueba metalúrgica de cianuración	131
5.3.1. Condiciones de la prueba	132
5.3.2. Resultados de la cianuración a 12 horas	132
5.3.3. Resultados de la cianuración a 24 horas	133
5.3.4. Resultados de la cianuración a 36 horas	133
5.3.5. Resultados de la cianuración a 48 horas	134
CAPITULO VI	138
DISCUSIÓN	138
CAPITULO VII	140
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	140
CONCLUSIONES:	140
RECOMENDACIONES:	142
BIBLIOGRAFÍA	143
ANEXOS	146

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis a DIOS, por guiarnos y darnos fuerzas para seguir adelante. A nuestros padres quienes nos dieron vida, educación, apoyo y consejos. A nuestros compañeros de estudio, maestros y amigos, quienes sin su ayuda nunca hubiéramos podido hacer esta tesis. A todos ellos se los agradecemos desde el fondo de nuestra alma. Para todos ellos hacemos esta dedicatoria.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente damos gracias a Dios por habernos iluminado en todo momento, para poder realizar este trabajo de investigación, gracias a nuestra alma mater, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, a través de su Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por nuestra formación académica y profesional.

A si mismo deseamos expresar nuestro agradecimiento al Dr. Vidal Sixto Aramburú Rojas, profesor y asesor por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a nuestras sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Gracias por la confianza ofrecida desde que llegamos a esta facultad. Nuestro reconocimiento a todos los docentes de la facultad por sus consejos y recomendaciones por hacer realidad esta tesis de Pregrado.

RESUMEN

La muestra representativa del relave refractario, para el presente estudio de investigación, proviene de la ciudad de Calpa, distrito de Atico, provincia de Caraveli del departamento de Arequipa, con una ley ensayada de 5.67 g/TM de oro.

La caracterización de la muestra se realizó en el microscopio óptico polarizado, en la escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la UNMSM, los resultados de esta caracterización indicaron la presencia de las siguientes especies mineralógicas: Covelita, Pirolusita, Psilomelano, Esfalerita, Ilmenita, Pirita, Hematita, Goethita y gangas.

En base a los resultados de la caracterización se realizaron pruebas metalúrgicas de flotación a una granulometría de 65.20% -200 malla con reactivos MIBC y Z11, obteniéndose una calidad del concentrado de 19.72 g/TM, con una recuperación de 78.20 % y 4.48 como radio de concentración de oro. Y plata obteniéndose una calidad de concentrado de 24.12 gr/TM; con una recuperación de 81.67%.

Con el concentrado de la mejor prueba de flotación, se realizaron pruebas metalúrgicas de biolixiviación, degradando 75.20% de fierro en solución para un tiempo de 15 días con un cultivo de cepas bacterianas 9K.

El concentrado biolixiviado de la mejor prueba de flotación se remolió hasta una granulometría de 83.29% -200 malla para realizar pruebas metalúrgicas de cianuración en botella a diferentes tiempos, la prueba más representativa es a 36 hrs. de cianuración, recuperando 95.38% de oro y 97.56% de plata, con 4.15 Kg/TM de cianuro de sodio y 10.20 Kg/TM de Cal.

El proceso metalúrgico adecuado de acuerdo a los resultados de la investigación de la presente tesis, para la recuperación de oro en relaves refractarios en la ciudad de Calpa, fue una flotación a agotamiento del relave, seguido de la biolixiviación del concentrado para liberar oro con cepas bacterianas 9k, y finalmente recuperar oro mediante el proceso de cianuración.

NOMENCLATURA

ppm	Partes por millón.
%	Porcentaje.
Oz/TM	Onza por tonelada métrica.
°C	Grados centígrados.
Cal/g	Caloría por gramo.
mm	Milímetro.
L/S	Relación líquido-sólido.
ml	Mililitro.
OHm	Resistencia eléctrica.
A°	Radio iónico / Radio atómico.
t/h	Toneladas por hora.
m ³ /h	Metros cúbicos por hora.
μ	Micra.
G's	Fuerza de gravedad.
VFD	Unidad de frecuencia variable.
Kg/h	Kilogramos por hora.
pH	Potencial de Hidrógeno.
"	Pulgada.
US\$	Dólares Americanos.
KW	Kilowatts.
hrs	Horas.

m^2	Metro cuadrado.
cm^3	Centímetro cúbico.
Kg	Kilogramo.
m	Metro.
TM	Toneladas métricas.
mg/lt	Miligramo por litro.
g	Gramo.
cm^2	Centímetro cuadrado.
g/TM	Gramo por tonelada métrica.
Psi	Libra por pulgada cuadrada.
min	Minuto.
g/lt	Gramo por litro.
Km	Kilómetro.
mm^2	Milímetro cuadrado.
mg/cm^2	Miligramo por centímetro cuadrado.
Eh	Potencial rédox.
lb/Oz	Libra por onza.
Bar	Unidad de presión.
° ' ''	Latitud (grados, minutos, segundos)
$mg/cm^2/h$	Miligramo por centímetro cuadrado por hora

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Coordenadas geográficas limitantes de Calpa	26
Tabla 2.	Límites de la provincia de Caravelí	26
Tabla 3.	Propiedad físicas del oro	37
Tabla 4.	Características físicas y Químicas de Plata (Ag)	49
Tabla 5.	Coletores para la flotación de oro	73
Tabla 6.	Componentes para el medio de cultivo de las bacterias T	90
Tabla 7.	Concentraciones máximas que inhiben la actividad bacteriana mesófila	93
Tabla 8.	Minerales observados en la muestra	114
Tabla 9.	Distribución volumétrica porcentual.....	115
Tabla 10.	Grados de liberación porcentual	116
Tabla 11.	Volúmenes y grados de liberación de los Minerales observados.....	119
Tabla 12.	Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa	120
Tabla 13.	Condiciones de la prueba en flotación	125
Tabla 14.	Balance metalúrgico de flotación para un consumo de 50.00 g/TM de Z-11	126
Tabla 15.	Balance metalúrgico de flotación para un consumo de 60.00 g/TM de Z-11	126
Tabla 16.	Balance metalúrgico de flotación para un consumo de 70.00 g/TM de Z-11	127
Tabla 17.	Balance metalúrgico de flotación para un consumo de 80.00 g/TM de Z-11	127
Tabla 18.	Porcentaje de Recuperación en función a la dosificación de Z-11	128
Tabla 19.	Condiciones de la prueba de biolixiviación.	129
Tabla 20.	Balance metalúrgico biolixiviación a 5 días.	129

Tabla 21.	Balance metalúrgico biolixiviación a 10 días	130
Tabla 22.	Balance metalúrgico biolixiviación a 15 días.	130
Tabla 23.	Balance metalúrgico biolixiviación a 20 días.	130
Tabla 24.	Condiciones de la prueba en cianuración.....	132
Tabla 25.	Balance metalúrgico de cianuración a 12 horas	132
Tabla 26.	Balance metalúrgico de cianuración a 24 horas	133
Tabla 27.	Balance metalúrgico de cianuración a 36 horas	133
Tabla 28.	Balance metalúrgico de cianuración a 48 horas	134
Tabla 29.	Porcentaje de recuperación en función al tiempo de cianuración.	134
Tabla 30.	Porcentaje de recuperación en función del consumo de cianuro	135
Tabla 31.	Porcentaje de Recuperación en función del consumo de Cal (CaO)	136
Tabla 32.	Resultados de flotación	138
Tabla 33.	Resultados de biolixiviación	139
Tabla 34.	Resultados de cianuración.....	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Producción mensual de oro (TMF)	45
Figura 2.	Estructura de la producción de oro por empresas, enero-mayo 2018	46
Figura 3.	Producción mensual de plata (TMF).....	55
Figura 4.	Estructura de la producción de plata por empresas, enero-mayo 2018.....	56
Figura 5.	Diferencia entre las propiedades del mineral útil y la ganga	57
Figura 6.	Tensión superficial de la burbuja de flotación.	58
Figura 7.	Bacteria y sus principales componentes.....	78
Figura 8.	Representación esquemática de la oxidación, catalizada por bacteria, de un cristal de pirita (FeS_2) en condiciones aeróbicas.	80
Figura 9.	Representación esquemática de la oxidación catalizada por la bacteria, de un cristal de pirita en condiciones mixtas: aerobia y anaeróbica.	81
Figura 10.	Utilización de energía por microorganismos	82
Figura 11.	Curvas de adaptación de bacterias	83
Figura 12.	Fases de crecimiento bacteriano	84
Figura 13.	Áreas de actividad de bacterias <i>Thiobacillus Ferrooxidans</i>	87
Figura 14.	Cianuración del oro	94
Figura 15.	Diagrama Eh-pH para el oro y el auro-cianuro, mostrando además los rangos de presión para los distintos otros procesos industriales de extracción de oro.....	96
Figura 16.	Disociación entre el HCN y el CN^- libre (26°C), mostrando la conveniencia de operar sobre pH 10	97

Figura 17. Diagrama Eh - pH para el sistema CN- - H ₂ O a 25°C, considerando una concentración total de cianuro de 10 ⁻³ molar	98
Figura 18. Diagrama Eh - pH para el sistema Au- H ₂ O-CN a 25°C, considerando una concentración total de cianuro de 10 ⁻³	99
Figura 19. Diagrama esquemático del proceso de disolución del oro mostrado como una corrosión electroquímica	100
Figura 20. Partículas libres de pirita (py), de gangas (GGs) y de goethita (gt); partícula entrelazada de goethita (gt) con la ganga (GGs). 200X.	121
Figura 21. Partículas libres de pirita (py), de goethita (gt) y de gangas (GGs). 200X.	121
Figura 22. Partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs). 200X.	122
Figura 23. Partículas libres de pirita (py), de gangas (GGs) y partículas entrelazadas de arsenopirita (apy) con la goethita (gt) y de goethita (gt) con la ganga (GGs). 200X.	122
Figura 24. Partículas libres de pirita (py), de calcopirita (cp) y partícula entrelazada de hematita (hm) con la goethita (gt). 200X.	123
Figura 25. Partícula libre de pirita (py) y partícula entrelazada de calcopirita (cp) con la calcocita (cc). 500X.	123
Figura 26. Partículas libres de pirita (py) y partícula entrelazada de calcopirita 8cp) con la pirrotita (po). 500X.	124
Figura 27. Partícula entrelazada de la calcocita 8cc) con la covelita 8cv) y con la pirita 8py). 500X	124
Figura 28. Porcentaje de Recuperación en función a la dosificación de Z-11	128
Figura 29. Porcentaje de disolución de Fierro en función al tiempo de biolixiviación.....	131

Figura 30. Porcentaje de recuperación en función al tiempo de cianuración.....	135
Figura 31. Porcentaje de recuperación en función del consumo de cianuro	136
Figura 32. Porcentaje de Recuperación en función del consumo de Cal (CaO)	137

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Dentro de la industria minero metalúrgica peruana, la extracción de valores metálicos preciosos (oro, plata) ha sido de mucha importancia para el desarrollo de nuestro país, por ser una de las principales fuentes generadoras de divisas de nuestro país.

Actualmente, el Perú es el séptimo país con más reservas de oro del mundo, con un 5% del total, que equivalen a unas 2800 toneladas métricas, sin embargo, sólo producimos menos del 20% del enorme potencial que tenemos, y gran parte de ello se debe a la falta de investigación y tecnología que se requiere para explotar minerales de oro de baja ley, afectando principalmente a la pequeña y mediana minería.

En diversas labores mineras auríferas de nuestro país, los relaves del proceso de flotación que contienen valores metálicos importantes no reciben un adecuado tratamiento para recuperar metales preciosos que aún lo acompañan, estos materiales ya pasaron por un proceso de conminación que forma la parte más costosa del procesamiento de minerales, y para procesarlos a veces es solo necesario una remolienda y en algunos casos de pre concentración, oxidación y cianuración para beneficio de dichos metales.

Si bien es cierto que el costo de tratamiento se eleva a medida que el tratamiento metalúrgico es más complejo, sin embargo debido a tecnologías de bajo costo y medioambientalmente amigables en auge como la biometalúrgia, hace posible el tratamiento de minerales y relaves refractarios para el beneficio de metales preciosos.

Es por ello que el presente trabajo surge por el interés de desarrollar procedimientos tecnológicos (Flotación – Biolixiviación – Cianuración) que puedan servir para recuperar el oro en relaves refractarios de cianuración.

CAPITULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción del problema

En el país existen muchos relaves de tipo refractario con presencia significativa de metales preciosos que no son explotados, por las características del material que hace difícil su recuperación económicamente rentable, generalmente algunos estudios realizados presentan recuperaciones bajas, causando que estos tipos de materiales sigan abandonados, por no tener un proceso metalúrgico apropiado.

El proceso convencional de lixiviación no es aplicable directamente a este tipo de materiales, porque los resultados metalúrgicos no son alentadores por la presencia de minerales como la arsenopirita, pirrotita y pirita que dentro de su estructura cristalina atrapan al metal precioso y lo hace imposible de liberarse por medios mecánicos y hace imposible su recuperación económicamente rentable.

El presente estudio de investigación surge por la necesidad de realizar un tratamiento adecuado de los relaves de cianuración de concentrados refractarios para la recuperación rentable de oro y plata en la localidad de Calpa – Arequipa.

2.1.1. El problema fundamental

El problema fundamental del presente trabajo de investigación radica en que los procesos convencionales como cianuración directa, no son aplicables a este tipo de materiales por su naturaleza refractaria que hace imposible la disolución del oro con cianuro, es decir los

resultados metalúrgicos no son alentadores, de ahí la necesidad de realizar trabajos de investigación para encontrar un tratamiento adecuado previo a la cianuración.

2.2. Justificación de la investigación

El estudio de investigación de la presente tesis, se justifica aplicando procesos metalúrgicos de Flotación, Biolixiviación y Cianuración, logrando así la recuperación de oro y plata en relaves de cianuración de concentrados refractarios en la zona de Calpa - Arequipa, Además teniendo en cuenta el cuidado del medioambiente, generalmente en el manejo del cianuro, respetando las normas establecidas por el estado.

2.2.1. Justificación tecnológica

La presente tesis se justifica tecnológicamente, ya que con el uso del proceso de biolixiviación como tecnología limpia, previo a la cianuración se logra recuperar el oro a partir de materiales refractarios en la zona de Calpa, empleando así procesos tecnológicos apropiados para la pequeña, mediana y gran minería.

Por lo expuesto, anteriormente, estamos dando la iniciativa para que se pueda viabilizar la recuperación de oro en relaves de naturaleza refractaria con tenores aceptables de metales preciosos; por lo tanto se justifica la investigación.

2.3. Objetivos

Los objetivos en el presente trabajo de tesis son:

2.3.1. Objetivo general

Recuperar oro y plata de relaves de cianuración de concentrados refractarios en la zona de Calpa – Arequipa, mediante procesos metalúrgicos de flotación - biolixiviación y cianuración.

2.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar el proceso metalúrgico de flotación para recuperar oro y plata a partir de relaves de cianuración de concentrados refractarios en la ciudad de Calpa – Arequipa.
- Estudiar el tratamiento metalúrgico de biolixiviación, para liberar oro y plata a partir de los concentrados de flotación de relaves de cianuración de concentrados refractarios en la ciudad de Calpa – Arequipa.
- Estudiar el proceso metalúrgico de cianuración, para recuperar oro y plata a partir de los concentrados de flotación de relaves de cianuración, biolixiviados, en la zona de Calpa – Arequipa.

2.4. Hipótesis y variables

2.4.1. Hipótesis general

Los procesos de Flotación, Biolixiviación y Cianuración, de los relaves de cianuración de los concentrados refractarios en la zona de Calpa, permitirá recuperar oro y plata.

2.4.2. Hipótesis específicas

El proceso adecuado de Flotación de los relaves de cianuración, permitirá la recuperación de oro y plata refractario.

El tratamiento de Biolixiviación de los concentrados de flotación de relaves de cianuración, en la segunda etapa, permitirá liberar oro y plata de su matriz pirítica.

El proceso de Cianuración de los concentrados de flotación, biolixiviados, en la tercera etapa, mejorará la recuperación de oro y plata.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Las variables a considerarse en la primera etapa de flotación:

2.5.1.1. Variable independiente:

Dosificación del colector.

2.5.1.2. Variable dependiente:

Porcentaje de recuperación de oro y plata.

2.5.1.3. Variables intervinientes controladas:

Velocidad de agitación.

Tiempo de acondicionamiento de pulpa.

Tiempo de flotación.

Granulometría.

Densidad de pulpa.

PH de flotación.

2.5.2. Las variables a considerarse en la segunda etapa, que es el proceso de biolixiviación:

2.5.2.1. Variable independiente:

Tiempo de biolixiviación.

2.5.2.2 Variable dependiente:

- Porcentaje de recuperación de oro.

2.5.2.3 Variables intervinientes controladas:

- Granulometría
- Velocidad de agitación
- Temperatura
- ORP
- Concentración de fierro
- Densidad de pulpa
- pH

2.5.3. Las variables a considerarse en la tercera etapa, de cianuración:**2.5.3.1. Variable independiente:**

- Tiempo de cianuración.

2.5.3.2. Variable dependiente:

- Porcentaje de recuperación de oro.

2.5.3.3. Variables intervinientes controladas:

- PH de cianuración.
- Concentración de cianuro de sodio.
- Densidad de pulpa.
- Granulometría.

2.6. Operacionalización de variables

Para procesar e identificar la influencia de las variables en el proceso, se aplicó los balances metalúrgicos, tanto en la primera, segunda y tercera etapa, que es la pre concentración, la flotación y la cianuración, a fin de evaluar, interpretar y optimizar las relaciones entre las variables, independientes y dependientes de los procesos estudiados.

CAPITULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes

El trabajo de investigación realizado por el Ing. Teodosio Pianto Lozano con el nombre de “Recuperación de oro y plata a partir de Minerales Aeríferos que contienen Arsenopirita y Pirrotitas, por los métodos de Cianuración y Lixiviación Ácida Thiourea” donde se realizaron las pruebas preliminares cuyo objetivo fue ver el comportamiento del mineral frente al cianuro con una concentración de cianuro de 0.5% llegando a una recuperación de 51.1 – 81.6% de Au se observa un alto consumo de cianuro alrededor de 45 Kg/TM y consumo de cal alrededor de 20Kg/TM. Como el consumo de cianuro fue demasiado alto se pasó a la segunda fase de las pruebas definitivas donde se bajó la concentración de cianuro a 0.3 y luego a 0.1% obteniéndose mayores recuperaciones de 73-91% alcanzando el mayor a 72 horas de agitación; pero con un tratamiento alcalino previo y una aireación abundante, es decir que el mineral requiere bastante oxidación y la eliminación de la solución pre-tratada y resultado posterior con agua fresca. Se logró reducir el consumo de cianuro a 9.0% Kg/TM. Incrementándose la Cal a 30 Kg/TM. En lo que respecta a la lixiviación ácida-Thiourea se logra una recuperación de 70-83% de oro. Pero el consumo de reactivo es excesivamente alto, por lo que requiere optimizar más los parámetros. [1, Pianto Lozano Teodosio - 1986]

La Investigación de Guido Odón Nanetti Sandoval y José Fernando Robles con el nombre de “Investigación del proceso de Bio-Lixiviación de sulfuros refractarios” plantean que la tecnología de la Bio-Lixiviación o Bio-oxidación utilizada en el tratamiento de minerales de oro en soluciones sólidas y/o encapsulados en sulfuros tipo pirita, se fundamenta en la acción efectiva de la bacteria *Thiobacillus Ferroxidans* para oxidar sulfuros minerales; específicamente

oxida el azufre y sus especies reducidas, de igual modo oxida el ion ferroso a ion ferrítico, liberando de esa manera los metales preciosos encapsulados por los sulfuros.

La oxidación de sulfuros de minerales por métodos biológicos particularmente a través de la acción de la bacteria *Thiobacillus Ferroxidans* puede permitir la combinación de dos mecanismos: Ataque microbial directo sobre la estructura atómica del mineral y ataque bacteria indirecta promovida por la regeneración de Fe^{+2} a Fe^{+3} . Las ventajas de la biolixiviación de sulfuros sobre procesos tradicionales para pre-tratar los minerales refractarios son: Menores costos de capital, operación a temperaturas y presiones ambientales, proceso no contaminante del medio ambiente, en los últimos años el rápido desarrollo de la biolixiviación a nivel industrial en el mundo está asociada a la extracción de oro en minerales y concentrados refractarios. [2, Guido Sandoval y Jose Robles 1997]

La investigación realizada por Vidal Sixto Aramburu Rojas “Modelo de la Pre-Aireación en concentrados de oro pirítico, para la optimización del proceso de cianuración-Utilizando el programa estadístico statgraphic Plus” El presente trabajo de investigación está orientando a estudiar nuevos esquemas de tratamiento como la Pre-Aireación con cal, que son procesos previos a la cianuración del concentrado. El modelo matemático obtenido para el proceso de Pre-Aireación, utilizando el diseño hexagonal indica que las variables que tienen mayor influencia son el pH y el tiempo y su interacción correspondiente, manteniendo constante la concentración de oxígeno, granulometría del concentrado y la dilución de la pulpa, por tener poca incidencia en el proceso. Obteniéndose una respuesta con una recuperación aceptable en el proceso de cianuración, que es bastante significativo en comparación con la cianuración directa convencional. En resumen las ventajas de la Pre-Aireación es que en la cianuración se educe el

consumo de cianuro de sodio en un 50% y mejora la recuperación en un 11.86% para este tipo de concentrados. [3, Dr. Vidal Aramburú, 2003]

3.2. Ubicación de Calpa

3.2.1. Ubicación Geográfica

La ciudad de Calpa se ubica en:

Departamento : Arequipa

Provincia : Caravelí

Distrito : Atico

3.2.2. Localización Geográfica

La provincia de Caravelí, es una de las ocho que conforman el departamento de Arequipa, en el Perú, bajo la administración del Gobierno regional de Arequipa.

Sus puntos extremos se encuentran comprendidos entre las siguientes coordenadas:

Tabla 1. Coordenadas geográficas limitantes de Calpa

Orientación	
Sur	15° 46' 21.95"
Norte	73° 21' 56.79"

Tabla 2. Límites de la provincia de Caravelí

Orientación	
Norte	Departamento de Ayacucho
Sur	Océano Pacífico
Este	Con las provincias de La Unión, Condesuyos y Camaná

3.3. Estudio del oro

3.3.1. El papel del oro en la historia

A lo largo de la historia no ha existido ningún tipo de metal tan aceptada como el oro. Siendo un metal de gran facilidad para formar aleaciones, y con una densidad y color que lo hacen difícil de imitar, el oro ha sido la principal elección para la creación y valorización de monedas desde hace 3 milenios. De propiedades únicas, con una ductilidad, maleabilidad y densidad que le dan características ideales para su uso en joyería y tecnología, la historia de este metal se desarrolla junto a la de la civilización misma, siendo uno de los protagonistas en los cambios de la humanidad desde que se empezó a utilizarlo. [4, Guillermo Zabaleta, Alonso (2000)]

Desde que el hombre empezó a minarlo, se calcula han sido extraídas 171,000 toneladas del metal. [4, Guillermo Zabaleta, Alonso (2000)]

Dicen los historiadores que las primeras piezas elaboradas en oro son aquellas encontradas en la necrópolis de Varna, en Bulgaria, que datan del año 4 600 antes de Cristo. Desde entonces el oro ya era considerado un símbolo de valor y pureza.

A pesar de su escasez, el oro ha sido conocido a lo largo de la historia por civilizaciones de todo el mundo. Esto se debe a que puede aparecer naturalmente en formas trabajables y

puras, como las conocidas pepitas de oro. Civilizaciones, aun con tecnologías simples, tenían acceso al oro gracias a los aluviones que, a lo largo del tiempo, han transportado y depositado minerales en cientos de ríos del planeta. Historiadores calculan que 5000 años atrás, egipcios aprendieron a fundir y crear aleaciones de éste con otros metales. A pesar de ello, no fue sino hasta el año 564 AC cuando Creso, el último rey de Lidia, creó la primera moneda estándar utilizando este metal. La moneda de Creso tenía un contenido uniforme de oro, y era universalmente reconocible e intercambiada alrededor de Europa. Lidia cayó en manos del imperio Persa, quienes decidieron adoptar el oro como principal metal para sus monedas. Al mismo tiempo, al otro lado del mundo, China emitía sus primeras monedas de oro, el ying yuan. Desde entonces, civilizaciones han nacido, crecido y desaparecido en búsqueda y conquista de tierras y oro.

El oro en el Perú aparece por primera vez en el valle de Vilcanota en los mitos de Tamputocco y Pacarictampu, como atributo esencial de su realeza, de su procedencia solar por la identificación de sol y oro en la mítica universal y de su mandato divino.

El oro se convierte para los Incas en símbolo religioso, señal de poderío y blasón de nobleza. El oro, escaso en la primera dinastía, obtenido penosamente de los lavaderos lejanos de Carabaya, brilla con poder sobrenatural en los arreos del Inca –en el tupayauri, los llanquis u ojotas de oro, la chipana o escudo y la parapura o pectoral áureo– y se reserva para las vasijas del templo y la lámina de oro que sirve de imagen del sol colocada hacia el Oriente, que debe recibir diariamente los primeros rayos del astro divino y protector. La mayor distinción y favor de la realeza incaica a los curacas aliados y sometidos, será iniciarles en el rito del oro, calzándoles las ojotas de oro y dándoles el título de *apu*. Y los sacerdotes oraban en los templos para que las semillas germinasen en la tierra, para

que los cerros sagrados echasen oro en las canteras y los Incas triunfasen de sus enemigos. [4, Guillermo Zabaleta, Alonso (2000)]

Los triunfos guerreros de los Incas encarecen el valor mítico del oro y su prestancia ornamental. El Inca vencedor exige de los pueblos vencidos el tributo primordial de los metales y el oro que ha de enriquecer los palacios del Cuzco y el templo de Coricancha. Todo el oro del Collao, de los Aymaraes y de Arequipa, y por último del Chimú, de Quito y de Chile, afluye al Cuzco imperial. Los ejércitos de Pachacútec vuelven cargados de oro, plata, umiña o esmeraldas, mullí o conchas de mar, chaquira de los yungas, oro finísimo del Tucumán y los Guarameaucas, tejuelos de oro de Chile y oro en polvo y pepitas de los antis. El mayor botín dorado fue, sin embargo, el que se obtuvo después del vencimiento del señor del Gran Chimú, en tiempo de Pachacútec. El general Cápac Yupanque, hermano del Inca y vencedor de los yungas de Chimú, reúne en el suelo de la plaza de Cajamarca donde más tarde habría de ponerse el sol de los Incas, con otro trágico reparto el botín arrebatado a la ciudad de Chanchán y a los réculos sometidos al Gran Chimú y a su corte enjoyada y sensual, en el que contaban innumerables riquezas de oro y plata y sobre todo de "piedras preciosas y conchas coloradas que estos naturales entonces estimaban más que la plata y el oro". [4, Guillermo Zabaleta, Alonso (2000)]

Podría considerarse que la utilización del oro como soporte económico se formaliza en la Edad Media, a través de los banqueros que reciben en depósito el oro de sus clientes y orfebres, emitiendo a cambio, recibos relacionados en término de pesos en oro, que servían de medio cobro pago, sin un valor oficial predeterminado diferente al valor del propio oro en sí. El primer país que realiza una fijación moneda oro, es Inglaterra en 1694, donde se

establece una paridad sobre la base de la emisión del Soberano de oro con una relación 0,257 Oz/lb ó 3,891 lb/Oz.

Durante las campañas napoleónicas, y la primera Guerra Mundial, la cotización del oro se suspende, pero el principio fundamental de mantenimiento de una paridad como medio para conseguir una estabilidad económica, que defendían los economistas clásicos, se mantiene. En definitiva, se estableció lo que en economía se conoce como Patrón Oro, que es un sistema monetario que permite convertir todos los medios de pago legales y cambiarlos por cantidades predeterminadas de oro. La adopción generalizada del Patrón Oro durante la segunda mitad del siglo XIX fue en gran parte debido a la Revolución Industrial que acarreo un enorme aumento de la producción de bienes y amplió la base del comercio mundial. Los países que adoptaron el Patrón Oro buscaban facilitar la consecución de transacciones financieras y comerciales internacionales, así como conseguir la estabilidad monetaria del país y los tipos de cambio. El primer lugar donde se adoptó el Patrón Oro fue en Gran Bretaña en 1816, en 1873 se extendió a Estados Unidos y en 1900 casi todos los demás países admitieron este sistema. Salvo algunas excepciones, el sistema del Patrón Oro se mantuvo hasta el crack de Wall Street de 1929 y la posterior gran depresión. Entre 1931 y 1934 los gobiernos de todos los países consideraron imprescindible o necesario abandonar el Patrón Oro. Esta Política se debía, en parte, a la creencia de que se podían aumentar las exportaciones de un país mediante la devaluación de su moneda modificando el tipo de cambio. Sin embargo, con el tiempo las ventajas que esta política tenía desaparecieron a medida que los demás países abandonaban a su vez el Patrón Oro. El papel del oro perdió importancia cuando el gobierno estadounidense, en 1975, comenzó a vender parte de sus reservas de este metal en el mercado libre, provocando que el oro pasara a ser un bien en

lugar de un patrón dentro del sistema monetario internacional. A finales de la década de los 70, las monedas principales dejaron de ser convertibles en oro. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

3.3.2. El oro en la naturaleza

El oro en la litósfera se encuentra en calizas, calcitas, riolitas, graníticas, compuestos de azufre metálico y en rocas sedimentarias, la plata y el cobre son elementos que acompañan con frecuencia la mineralogía del oro; el arsénico, antimonio, bismuto, hierro, plomo y cinc están también generalmente asociados. (Ramírez J., 2005)

Los filones que contienen oro, sometidos a la acción del tiempo y la meteorización, liberan el oro o bien quedan en el manto del suelo, como arenas aluviales o es arrastrado a los arroyos vecinos para formar placeres.

Se reconocen tres tipos de depósitos:

- Vetas y filones.
- Placeres de cuarzo aurífero.
- Depósitos mineralizados.

Los depósitos de cuarzo conglomerado, que significan el 50% de la producción mundial, generalmente son clasificados como paleo-placeres modificados.

Aunque el oro es un elemento raro, aparece en la naturaleza diseminado en pequeñas cantidades, como es el caso del yacimiento de Lagunas Norte de la minera Barrick

Misquichilca, que también se encuentran en filones que tienen relación genética con rocas ígneas de tipo silícico.

3.3.3. Minerales auríferos principales

- ***Elementos nativos y aleaciones naturales***

Oro nativo

Oro argentífero (electrum) (Au, Ag)

Oro cuprífero (cuproaururo) (Ag, Cu)

Oro paladinífero (porpezita) (Au, Pd)

Oro platinífero (Au, Pt)

Amalgama de oro (Au_2Hg_3)

- ***Sulfuros***

Uylembogaardtita (Ag_3AuS_2)

- ***Teluros***

Calaverita (Au, Te_2)

Krennerita (Au, Ag, Te_2)

Petzita (Ag_3 , Au, Te_2)

Sylvanita (Au, Ag, Te)

Kostovita (Au, Cu, Te_4)

- ***Antimoniuro***

Aurostibita (Au, Sb_2)

Oro nativo

El oro nativo generalmente contiene Ag, Cu y Fe y desde trazas hasta menores proporciones de algunos de los siguientes elementos: Li, Na, K, Mg, Ca, Zn, Cd, Hg, Bi, Al, Ge, Pb, Ti, As, Sb, Te, Mn, Pt y tierras raras. El oro nativo de los placeres generalmente contiene menores proporciones de plata que los correspondientes yacimientos primarios y contiene mayor pureza, debido a que la plata y otros elementos han sido parcialmente lixiviados. [6, Marsden, John; House, Lain. - 1960]

Un estudio de minerales auríferos de veta y placeres demostró que de 24 elementos detectados (incluye el oro) los elementos comunes para todas las muestras eran Ag, Cu, Fe y Ti, además de éstos en las muestras de veta eran: Pb, Pd, Bi, V, Ni, Co y en las muestras de placeres eran Ti, Zr, La y Cr. [6, Marsden, John; House, Lain. 1960]

Formas de oro nativo:

- Esponja: Deslustrado
- Escama: Laminilla
- Pepitas: Granos
- Hojuelas: Hoja, lóbulo

Electrum

La mayor parte de la plata en el oro se encuentra como constituyente de la red cristalina, existe un amplio rango sustitucional que va desde el oro nativo a través del oro argentífero (electrum), plata aurífera (kustetita) hasta plata nativa. Electrum se denomina al oro que contiene

entre 2% a 55% de Ag, en el Perú es muy común por: Millotingo, Colqui, San Juan de Lucanas.
[6, Marsden, John; House, Lain. - 1960]

Minerales asociados al oro

El oro es un micro constituyente común en un gran número de sulfuros y sulfuarseniuros, se concentra en las especies de Cu, Ag y Sb, en la pirita y arsenopirita, los sulfuros de Pb y Zn y las sulfosales normalmente no contienen altos valores de oro.[6, Marsden, John; House, Lain. - 1960]

En la galena el oro ocurre como finas inclusiones de oro nativo, la chalcocita, bornita y calcopirita ocasionalmente tienen valores significativos de oro. [6, Marsden, John; House, Lain. - 1960]

En la pirita y arsenopirita el oro ocurre [6, Marsden, John; House, Lain. - 1960]:

1. Como solución sólida (oro invisible) se presenta en dos formas:

- *Catiónica*; en la cual el oro sustituye al Fe de la pirita y arsenopirita
- *Aniónica*; en la cual el oro reemplaza átomos de As de arsenopirita, los radios atómicos del oro y arsénico son muy similares (Au=1.44; As=1.39)

2. Oro visible como ampollas de exolución, inclusiones, microvenillas, relleno de intersticios, reemplazamiento y microhalos.

La limonita y el wad tienden a ser los portadores más comunes de oro, especialmente cuando estos óxidos ocurren muy próximos a yacimientos auríferos, se ha encontrado hasta 1.3 Oz/TM de oro y más de 100 Oz/TM de Ag en el wad, grafito, carbón amorfo y materiales carbonosos

que son referidos como carbón, se encuentran frecuentemente en depósitos de oro, el cuarzo es el mineral más común de todos los yacimientos de oro y son de tipo incoloro o blanco lechoso, negro, gris, moteado de negro y blanco, pardo, rojo, amatista y verde. [6, Marsden, John; House, Lain. - 1960]

Generalmente la pirita después del cuarzo es el sulfuro más importante en los yacimientos auríferos. Hematita, magnetita e ilmenita comúnmente se encuentra en los placeres auríferos. [6, Marsden, John; House, Lain. - 1960]

Telururos de oro

Son los únicos otros minerales de oro, aparte del oro metálico que tiene importancia económica, generalmente se encuentran asociados con oro nativo y con sulfuros. A estos minerales pertenece la calaverita (AuTe_2) y krennerita ($(\text{Au.Ag}) \text{Te}_2$), los cuales tienen alrededor de 40% de oro, y la silvanita (AgAuTe_4), que también contiene plata y presenta alrededor de 25% de oro. [6, Marsden, John; House, Lain. - 1960]

Oro en otros minerales

Existen otros minerales que también contienen oro como la auroestibina (AuSb_2), oro con cobre porfirítico y como la kostovita (CuAuTe_4). [6, Marsden, John; House, Lain. - 1960].

3.3.4. Propiedades físicas del oro

El oro, Au del latín Aurum, es un elemento metálico muy denso, amarillo dorado brillante por la luz reflejada en él, pero como otros metales, finamente pulverizado presenta un color

negro y en suspensión coloidal su color varía entre el rojo rubí y el púrpura. Es uno de los metales nobles de mejores características y uso más extendido debido a sus singulares propiedades, sin duda el oro es apreciado desde tiempos remotos, por su belleza así como por su inalterabilidad en diversos ambientes. Su presencia en la corteza terrestre es de 0,0011 ppm y representa el $4 \times 10^{-7} \%$ en peso de la corteza. En todos los tiempos el oro, ha concitado el interés humano porque este metal ha sido empleado principalmente con fines monetarios o decorativos, su rareza e inalterabilidad han hecho de él un símbolo de riqueza y poder. En la tabla 3 se observa sus propiedades físicas.

Tabla 3
Propiedad físicas del oro

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Número atómico	79	
Peso atómico	196,96	gr.mol ⁻¹
Densidad a 20° C	19,32	gr.cm ⁻³
Punto de fusión	1 064,4	° C
Punto de ebullición	2 808	° C
Electronegatividad	2,54	eV
Radio atómico	0,1439	Nm
Energía de ionización	890	KJ.mol ⁻¹
Volumen atómico a 20° C	10,21	cm ³ .mol ⁻¹
Calor específico	0,138	J.gr ⁻¹ .K ⁻¹
Conductividad térmica a 20° C	3,14	W.cm ⁻¹ . K ⁻¹
Resistividad eléctrica a 20° C	2,06x10 ⁻⁶	Ω.cm
Entalpía de fusión	12,77	KJ.mol ⁻¹
Entalpía de vaporización	324,4	KJ.mol ⁻¹
Dureza	2,5	Mohs
Dureza	20-30	Vickers
Límite elástico	55	MPa
Resistencia a la tracción	130	MPa
Relación de Poisson	0,42	-
Módulo de tracción	78,5	GPa
Módulo volumétrico	171	GPa
Coefficiente de dilatación lineal a 20° C	14x10 ⁻⁶	° C ⁻¹
Función de trabajo fotoeléctrico	4,8	eV

Fuente: (Tremolada. J, 2005)

El descubrimiento en el siglo XIX, respecto a la solubilidad del oro en soluciones alcalinas de cianuro, condujo al desarrollo del proceso de cianuración para la recuperación del oro a partir de sus menas.

Desde aquel tiempo han tenido lugar muchos y grandes desarrollos teóricos y prácticos, haciendo de este proceso cada vez más adecuado para la recuperación económica del oro a partir de diferentes tipos de menas. La teoría clásica de disolución de oro en soluciones de cianuro ha sido cambiada, y en la actualidad se basa en la teoría electroquímica, para facilitar las investigaciones sobre la cinética de disolución.

Se puede decir que el oro es prácticamente inoxidable e inalterable en condiciones normales de trabajo, se le emplea en forma de aleaciones porque es muy caro y blando para la mayoría de aplicaciones industriales para lo cual se utilizan en su mayoría el platino y la plata que presentan similares radios atómicos, valencia y carácter electronegativo, debido a esto pueden formar entre sí disoluciones sólidas de sustitución total, para cualquier proporción. También puede admitir cobre en disolución sólida siendo la solubilidad de éste limitada en el oro. [7, Luna Córdova, Henry. - 2016]

3.3.5. Propiedades químicas

El oro se encuentra situado en el grupo B del sistema periódico con la configuración electrónica: $\text{Au} = [\text{Xe}]4f^{14}5d^{10}6s^1$. Sus estados de oxidación más importantes son las valencias +1 y +6. Su potencial normal de reducción a 25° C es 1,5 V; debido a esto, no reacciona con el oxígeno ni con el azufre, ni siquiera a elevadas temperaturas, encontrándose junto con el platino, en la zona de estabilidad más alta del diagrama de Ellingham.

Tampoco reacciona con los ácidos: sulfúrico, fosfórico y nítrico (excepto a muy alta concentración), ni con todos los ácidos orgánicos, incluso a ebullición.

Es el menos electronegativo de todos los metales debido a la estabilidad del único electrón periférico de su átomo, el cual se encuentra fuertemente ligado al núcleo resultando en ello una tendencia muy marcada al estado metálico y una débil reactividad. No se encuentra en forma de compuestos iónicos, por lo que su enlace es siempre covalente.

El oro se disuelve cuando se combina un ácido oxidante (HNO_3 por ejemplo) con un ácido halogenhídrico (HCl por ejemplo), o estos ácidos con agua oxigenada o ácido crómico. También se disuelve con los cianuros alcalinos en presencia de oxígeno.

El oro se deja acomplejar por la thiourea y esta reacción es la base de una tecnología alternativa a la cianuración en Rusia. No obstante, nunca ha podido competir con la cianuración. Sus compuestos más comunes son el cloruro áurico y el ácido cloro áurico (AuHCl_4), que se forma al tratar oro con agua regia y que se usa en fotografía. El dicianoaurato (I) de potasio o aurocianuro potásico es muy tóxico. [7, Luna Córdova, Henry. 2016]

3.3.6. Propiedades mecánicas

El oro es un metal maleable y dúctil, en forma de lingote se le puede trocear, modelar y martillar en frío; en forma de lámina, puede no sobrepasar el espesor de un quinceavo de micra, es decir la décima quinta parte de una milésima de milímetro (0.0001mm), las cuales dejan pasar la luz tomando un color verde azulado, pero con la luz reflejada presenta su color característico. Con una onza de oro, es decir con aproximadamente 30 g, se puede cubrir una

superficie de 30 m². En la forma de hilo el oro se puede estirar hasta alcanzar longitudes increíbles, una onza de metal alcanzaría más de 90 Km. El oro es muy resistente, su límite de elasticidad es de 4 Kg/mm², su carga de ruptura alcanza los 13 Kg/mm². Es de fácil soldadura autógena, buen conductor eléctrico y buen aislante del calor y del frío [7, Luna Córdova, Henry. - 2016].

3.3.7. Utilidades del oro

Encontramos en la demanda del oro tres fuentes [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]:

Joyería

Inversión

Tecnología

Joyería:

La demanda por joyería es el componente con mayor porcentaje debido a su volumen, alrededor de un 59%, aunque hay que destacar que estos últimos años se ha reducido el consumo de joyas debido la crisis financiera internacional. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

La India es el principal mercado de joyas a nivel mundial debido a la cultura y tradición que mantiene este país. El oro es visto como un regalo de los dioses, proporcionando la seguridad social, un símbolo de riqueza y prosperidad. China es el mercado que tiene un crecimiento rápido de joyas de oro en el mundo. Los consumidores chinos quieren un nivel de pureza en las joyas de oro, aproximadamente un 80%. Estados Unidos es el mercado más

importante en cuanto al consumo de joyas de oro. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

Inversión:

Las principales razones de por qué invertir en oro son:

- *Diversificación de la cartera.*

La mayoría de las carteras de inversión incorporan acciones y bonos, que son activos financieros muy tradicionales. El hecho de diversificar nuestra cartera nos puede ofrecer mayor protección contra las fluctuaciones en el valor de cualquier activo. Es decir, que si una cartera contiene oro, normalmente, es más robusta y menos volátil. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

- *Gestión del riesgo.*

Sabemos que el oro es un activo menos volátil que el resto de los productos financieros. Es decir, que activos con baja volatilidad nos ayuda a reducir el riesgo global de nuestra cartera y también nos ayuda a gestionar el riesgo con mayor eficacia mediante la protección contra los eventos negativos poco frecuentes. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

- *Moneda de cobertura.*

Se utiliza el oro como una cobertura contra las fluctuaciones de las monedas, en particular, el dólar americano. Por lo que una caída en el dólar produce un aumento en el precio del oro, es decir, que es uno de los activos más eficaces en la protección contra la debilidad del dólar. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

La inversión en oro puede tomar muchas formas, como:

- *Lingotes y monedas*

La compra de lingotes es el medio más rentable de poseer oro. El valor de mercado de las monedas de oro es determinado por el contenido de oro que lleva dicha moneda más un margen de beneficio que varía entre las monedas y los comerciantes, entre un 4% y un 8% aproximadamente. Por tanto, la compra de lingotes y monedas de oro es muy popular entre los inversionistas pequeños y medianos. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

- *Acciones*

La mayoría de las carteras de inversión mantienen activos financieros como por ejemplo acciones y bonos. Tener una cartera diversificada da mayor protección, es decir, que por lo general tener una cartera que contiene oro es menos volátil y más resistente. Es satisfactorio acceder al mercado del oro a través de la compra de acciones de empresas mineras de oro, ya que una acción de oro no sólo depende del precio del futuro del oro, sino que también depende de la visión futura de las empresas. Las acciones mineras dan oportunidades de revalorización del capital y de ganar dividendos. Generalmente, si la cotización del oro aumenta, los dividendos y los beneficios subirán. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

- *Futuros*

En los contratos de futuros de oro, hay el compromiso de comprar o vender una cantidad determinada, en una fecha específica y a un precio que se haya acordado de antemano. Por tanto, los inversores se aprovecharán de su inversión significativamente obteniendo increíbles beneficios, pero en el caso de que haya un movimiento opuesto en el precio del oro alcanzarían pérdidas. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

- *Fondos de Inversión*

Son productos financieros que proporcionan a los inversores la evolución de los precios de los lingotes de oro. También, ofrece a los inversores poder participar en el mercado de los lingotes de oro sin la necesidad de tomar la entrega física del oro. Estos fondos se negocian en una diversidad de bolsas de valores en el mundo. La mayoría de los fondos de inversión ofrecen programas de inversión en oro. Con estos fondos, los inversores compran el riesgo de mercado, en lugar del riesgo específico. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

Tecnología

Es el elemento con menor porcentaje de la demanda. Aproximadamente, el 12% de la demanda de oro proviene de las aplicaciones tecnológicas. Las investigaciones realizadas durante la última década han descubierto una serie de aplicaciones nuevas para el oro. Esta fabricación se produce en países como Asia, Europa y América del Norte. El oro proporciona una excelente utilidad debido a sus propiedades técnicas, además de ser manipulado físicamente ya que es maleable y dúctil. El oro es utilizado para [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]:

- ***Electrónica***

Los fabricantes de este sector utilizan el oro para crear componentes para sistemas informáticos, teléfonos y televisores. Millones de máquinas se fabrican cada año y el oro juega un papel muy importante en muchos de sus componentes. El uso más importante del oro es, en el caso de la electrónica, un alambre fino que conecta a los circuitos de los semiconductores o al cerebro del ordenador. El oro es esencial en los circuitos de todos los equipos debido a su conductividad eléctrica y porque no se degradan con el paso del tiempo. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

- ***Medicina***

El oro demuestra ser biocompatible dentro del cuerpo humano, lo que resulta ser en un gran porcentaje de aplicaciones directas de oro como material médico. El oro es resistente a las bacterias y puede ser utilizado para implantes donde existe un alto riesgo de infección. Actualmente, muchas aplicaciones biomédicas incluyen el uso de alambres de oro en los marcapasos, implantes para el ojo y el oído interno. Además, está siendo investigado para tratamientos de otras enfermedades como es el caso del cáncer. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

- *Espacio*

Durante muchos años, el oro ha sido un componente clave para la tecnología espacial y la exploración. Su eficacia como reflector de calor y la radiación infrarroja ha sido invaluable en numerosas empresas de la NASA. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

- *Láser*

En este caso, el uso del oro en los láseres es para poder tener un control del foco. Esto nos lleva a tener que darle mucha importancia a la medicina, ya que ayuda a la destrucción puntual de células cancerosas, a la cirugía de los ojos y al tejido cerebral. También, estos láseres son utilizados para rejuvenecer los tejidos de la piel que han sido dañados por quemaduras o lesiones. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

- *Ingeniería*

En este sector, el oro proporciona buena resistencia en muchos casos, como en la oxidación o la corrosión. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

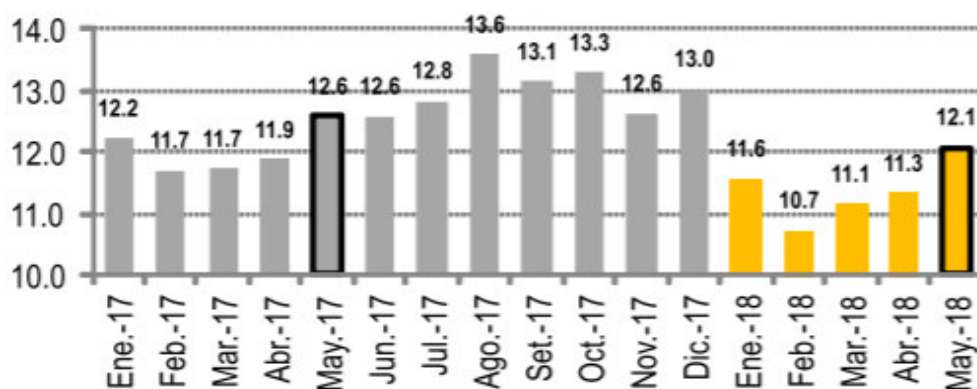
Los nuevos avances en la tecnología, en cuanto a la demanda de oro, es posible que sea para obtener más avances en nuevos diagnósticos médicos, la purificación del agua y las células solares. [5, Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel 2012]

3.3.8. Producción nacional de oro por regiones

La producción aurífera nacional, a pesar de registrar un crecimiento de 6.6% con respecto al mes anterior, reportó una caída de 4% con respecto al mes de mayo del año 2017. Este resultado negativo se debió principalmente a la disminución en los volúmenes de producción de Minera Yanacocha S.R.L. (-20.6%), Minera Barrick Misquichilca S.A. (-34.1%) y Compañía Minera Poderosa S.A. (-56.2%). No obstante, Compañía de Minas Buenaventura lideró el crecimiento, mostrando un considerable aumento en su producción (32.5%) principalmente en su unidad minera "Orcopampa". Así, el resultado obtenido en el mes de mayo se tradujo en una disminución del metal precioso de 5.4% en el acumulado enero - mayo de 2018 con respecto al mismo periodo del año anterior.

A nivel regional, La Libertad se mantuvo como la principal región productora de oro con una participación de 25.4%; seguido por Cajamarca y Arequipa con una participación de 19% y 17.6%, respectivamente. [8, Ministerio de Energía y Minas -2018]

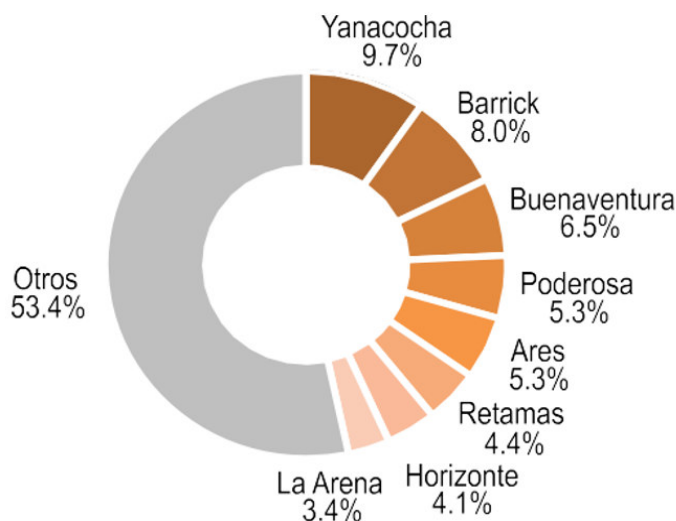
Figura 1: Producción mensual de oro (TMF)



Datos preliminares. Incluye la producción estimada de mineros artesanales de las regiones de Madre de Dios, Puno, Piura y Arequipa.

Fuente: Declaración Estadística Mensual (ESTAMIN) - Ministerio de Energía y Minas (MINEM)-2018.

Figura 2: Estructura de la producción de oro por empresas, enero-mayo 2018



Datos preliminares. Incluye la producción estimada de mineros artesanales de las regiones de Madre de Dios, Puno, Piura y Arequipa.

Fuente: Declaración Estadística Mensual (ESTAMIN) - Ministerio de Energía y Minas (MINEM)-2018.

3.4. Plata

3.4.1. Historia

La plata ha sido un activo multifacético a largo de la historia; es uno de los siete metales conocidos desde la antigüedad, se menciona en el libro del Génesis. Se constató como un metal libre y fácilmente trabajado en forma útil, ampliamente utilizado por el hombre desde sus principios; los montones de escoria hallados en Asia Menor e islas del mar Egeo, indican que el metal comenzó a separarse del plomo al menos cuatro milenios antes de nuestra era. Su nombre proviene de una evolución del adjetivo "plattus", procedente del latín medieval,

significando "ancho, aplanado" y posteriormente "lámina metálica", se utilizó para nombrar los lingotes del metal que los romanos habían llamado "argentum" (el origen del símbolo Ag). El vocablo en latín argentum quiere decir arg para "blancos" o "brillantes" y del griego ἄργυρος. La raíz indo-europea de esos vocablos, tanto del latín como del griego, significa brillante.

Las propiedades del metal, su color blanco, brillo imperecedero, insensible al fuego, raro y poco frecuente justificó la atribución del metal junto con el oro, que ambos no eran sino regalos de la naturaleza, formados uno por la influencia de la Luna, y el otro por el del Sol, con propiedades que no tenían otros minerales; de aquí se derivan los primeros intentos de los alquimistas de transformar otros minerales en oro y plata.

La plata, como el resto de los metales, sirvió para la elaboración de armas de guerra y luego se empleó en la manufactura de utensilios y ornamentos de donde se extendió al comercio al acuñarse las primeras monedas de plata y llegando a constituir la base del sistema monetario de numerosos países.

La belleza, el peso y la falta de corrosión de la plata la han hecho un depósito de valor y, por tanto, uno de los primeros metales para ser utilizado como un medio de intercambio. Tiene una belleza natural legendaria, tiene una historia de 5000 años como activo financiero y monetario, es una mezcla entre un producto básico y un activo financiero por lo que el metal ocupa un espacio notable en los mercados financieros en el mundo.

El Río de la Plata en Sudamérica, primeramente nombrado mar dulce por Juan Díaz de Solís en 1516 debe su actual nombre a Sebastián Caboto, quien creyó que allí abundaba el precioso metal y de donde tomará el nombre la Argentina, un mineral con contenido de plata. Con base al artículo 4º de la Ley Minera, la plata es un mineral concesible. [9]

3.4.2. Características

La plata pura es un metal brillante, resistente, dúctil y maleable, de todos los metales tiene el color blanco óptico reflectivamente más alto y la conductividad térmica y eléctrica más alta, presenta un brillo blanco metálico susceptible al pulimiento. Desde el punto de vista químico, es uno de los metales pesados y nobles; desde el punto de vista comercial, es un metal precioso. La plata es un elemento escaso en la naturaleza, de la que representa una parte en 10 millones en la corteza terrestre. Se puede encontrar en estado nativo aunque generalmente se encuentra en minerales que contienen compuestos de plata, como con azufre (argentita, Ag_2S), arsénico (proustita, Ag_3AsS_3), antimonio (pirargirita, Ag_3SbS_3) o cloro (plata córnea, AgCl) siendo sulfuros y sulfosales su forma principal, la mayor parte de su producción aproximadamente las tres cuartas partes se obtiene como un subproducto, sobre todo del cobre y plomo. Muchos son los minerales que contienen plata entre los que están presentes en el mineral como se muestra.

[9]

3.4.3. Propiedades Físicas y Químicas de la Plata (Ag)

Tabla 4. Características físicas y Químicas de Plata (Ag)

Elemento químico “ Plata “
Nombre Plata
Símbolo Ag
Color blanco neto y admite un pulido brillante
Dureza Mohs 2.5 a 3.
Propiedad Maleable, Dúctil (menos que el oro)
Número atómico 47
Valencia 1
Estado de oxidación +1
Electronegatividad 1,9
Radio iónico (nm) 0,126
Radio atómico (nm) 0,144
Configuración electrónica [Kr] 4d10 5s1
Primer potencial de ionización (kJ/mol) 758
Segundo potencial de ionización (kJ/mol) 2061
Potencial estándar 0,779 V (Ag+ / Ag)
Masa atómica (g/mol) 107,87 g.mol ⁻¹
Densidad (g/cm³ a 20oC) 10,5
Punto de ebullición (°C) 2212 °C
Punto de fusión (°C) 962 °C
Propiedades químicas Se alea con la mayoría de los metales.
Conductividad Gran conductividad térmica y eléctrica.
Buena para instalaciones químicas

Se obtiene por varios procedimientos: Amalgamación, cianuración, piroquímico, copelación y electrolisis.

Resiste a la acción de las soluciones alcalinas, de los álcalis fundidos y de la mayoría de los ácidos orgánicos.

Reacciona con el Oxígeno. El oxígeno se difunde a través de la plata mucho más fácil que a través de otros metales; y la plata es el único metal que expulsa el oxígeno de su solución, al solidificar. En estado sólido el oxígeno es muy poco soluble en la plata.

No se oxida fácilmente.

Reacciona con el azufre o el sulfuro de hidrógeno [9]

3.4.4. Usos

De la demanda de plata mundial aproximadamente el 70% se usa con fines monetarios; buena parte se emplea en orfebrería, y menores cantidades en la industria fotográfica, química y eléctrica. Por lo tanto, las principales categorías de uso incluyen: fabricación de monedas y medallas, aplicaciones industriales incluyendo los componentes eléctricos y electrónicos, joyería y platería y la fotografía. La demanda de plata en aplicaciones electrónicas y otras aplicaciones industriales se redujo, mientras que el uso de la plata en joyería, aleaciones de soldadura, monedas de plata, y fotovoltaica aumentó. El uso de pequeñas cantidades de plata en vendas y productos farmacéuticos para el cuidado de heridas e infecciones menores de la piel también va en aumento.

Desde 2011, empezó la reducción del uso mundial de plata con la excepción de la moneda y la fabricación de medallas, que se incrementó en casi un 19% desde 2010. Una fuente importante de demanda de la plata se relaciona con su adquisición como inversión. Las propiedades únicas de la plata restringen su sustitución en la mayoría de las aplicaciones.

El aumento en las monedas se debió a una mayor inversión en metales preciosos como consecuencia de la lentitud del crecimiento económico y la elección de plata en lugar de oro como una inversión por el precio aún más alto de oro.

A partir del año 2000 comenzó la disminución de su uso en la fotografía en respuesta a la tecnología de la cámara digital y el descenso de la producción de la película de color y papel. Aunque la plata todavía se utiliza en películas de rayos x, las instalaciones de imagen han tenido transición a los sistemas de imágenes digitales.

Los principales componentes de la demanda industrial de plata son: aleaciones y soldaduras, catalizadores, eléctrica, (incluyendo la energía fotovoltaica) electrónicos y otras aplicaciones. Las Aleaciones de soldadura de plata son utilizadas ampliamente en una variedad de aplicaciones, incluyendo aire acondicionado y refrigeración y distribución de energía eléctrica. También son importantes en la industria automotriz y aeroespacial. Como catalizador, la plata se puede utilizar en forma de pantallas de malla o cristales para producir ingredientes esenciales en los plásticos. Una de las aplicaciones eléctricas de plata es en baterías. La pila de óxido de plata más común fue la batería de tipo botón pequeño utilizado en calculadoras, cámaras, audífonos, juguetes y relojes, que contiene aproximadamente 35% de plata en peso. Algunas baterías de óxido de plata y plata-zinc más grandes se utilizan en aplicaciones militares.

La plata también se utiliza en los conductores, contactos, fusibles, interruptores y temporizadores. Los interruptores son utilizados en teclados de computadoras, hornos de microondas, teléfonos, televisores y juguetes. Tintas y películas a base de plata se aplican para crear caminos eléctricos en placas de circuito impreso y en la identificación por radiofrecuencia (RFID). La Pasta de plata se utiliza en el 90% de todas las células fotovoltaicas de silicio cristalino, el tipo más común de célula solar, siendo este un mercado en crecimiento en los últimos años.

Debido a las propiedades antibacterianas de la plata, también se utiliza en productos tales como ropa, máquinas de lavandería, zapatos y cepillos de dientes. Plata incrustada en superficies se utiliza para reducir las infecciones por estafilococos, y los desinfectantes a base de plata se han introducido con bajo costo, opción ambientalmente sensible para su uso en los centros de atención y las instalaciones de procesamiento de alimentos. La amalgama dental ha ido en descenso en el uso, debido a su contenido de mercurio.

La plata coloidal, que es una disolución de nitrato de plata y de algunos compuestos insolubles como potasio, se usa en medicina como antiséptico y bactericida. El argirol, un compuesto de plata, es un antiséptico local para ojos, oídos, nariz y garganta. Los haluros de plata también son fotosensibles (bromuro de plata, cloruro de plata y yoduro de plata), se oscurecen al exponerlos a la luz y se utilizan en emulsiones para placas, película y papel fotográfico. La plata deslustrada se utiliza mucho como catalizador oxidante en la producción de ciertos materiales orgánicos.

En joyería, debido a que el precio de la plata se incrementó durante 2011, el uso de la misma disminuyó con la introducción de metales alternativos. Actualmente esto quedó atrás favorablemente y su uso se ha incrementado.

En la actualidad la plata aún sigue siendo un activo financiero muy importante usado por los inversionistas privados en el mundo entero, tanto institucionales como individuales, utilizan la plata como un activo de inversión, incluso si los gobiernos ya no lo usan como dinero. En los últimos años, se han invertido montos cada vez más altos en activos relacionados con la plata. Se ha hecho todo tipo de inversiones, desde inversiones de capital en operaciones mineras relativas a la plata; en empresas de exploración de plata; contratos a futuro e incluso, en instrumentos de inversión más nuevos, como fondos comercializados en la bolsa basados en la plata. Su precio ha sido relativamente volátil a través del tiempo, uno de los principales factores que afecta el precio de la plata es la oferta disponible frente a la demanda de fabricación. En los últimos años, la fabricación de la demanda ha superado en gran medida la producción minera obligando a los participantes en el mercado a reducir las existencias para satisfacer la demanda. [9]

3.4.5. Potencial Geológico

La plata nativa es de ocurrencia rara, está distribuida ampliamente en pequeñas cantidades. Puede ser de origen primario asociada a otros minerales de plata, pero en general es claramente secundaria formada por la acción de vapores de agua caliente o del oxígeno sobre sulfuros de plata, o por la acción de sulfuros metálicos o arseniuros sobre el cloruro de plata entre otras acciones.

La plata se encuentra principalmente en vetas relacionadas a intrusivos, más comúnmente dentro de rocas metamórficas cristalinas, en rocas eruptivas y a veces sedimentarias regularmente calizas, se presenta también en la zona de oxidación de yacimientos de plata y algunos polimetálicos ocurriendo en masas o en figurillas arborescentes y filiformes, en forma disseminada, y por lo general invisible en varios sulfuros metálicos.

La mayoría de los recientes descubrimientos de plata se han asociado con ocurrencias de oro; Sin embargo, las ocurrencias de cobre y de plomo-zinc que contienen plata como subproducto seguirán representando una parte significativa de las reservas y de los recursos futuros.

En México se localizan importantes yacimientos en la parte central del altiplano formando una franja NW-SE (Faja de Plata) que abarca los estados de Hidalgo, Querétaro, Guanajuato, San Luis Potosí, Aguascalientes, Zacatecas, Durango y Chihuahua, asociada a vetas epitermales y depósitos de reemplazamiento, en algunas regiones el tipo skarn es significativo; también encontramos yacimientos a lo largo de la Sierra Madre Occidental que consisten principalmente en vetas hidrotermales y brechas predominantemente acogidas en secuencias volcánicas más jóvenes.

La Faja de Plata en México, es una de las zonas más productivas en plata mundialmente hablando y dentro de ésta, el estado de Zacatecas el más destacado. [9]

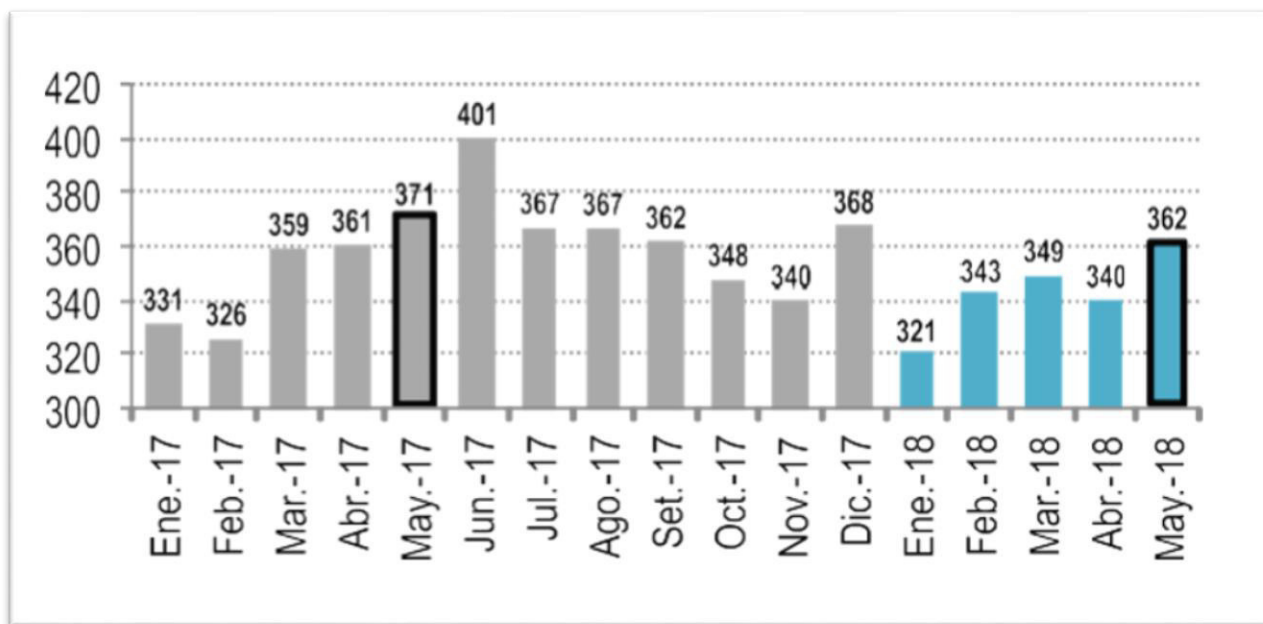
3.4.6. Producción de plata (Ag)

En mayo de 2018, la producción nacional de plata registró una disminución (-2.6%) con respecto al mismo mes del año anterior. Cabe mencionar que Compañía Minera Ares S.A.C., tercera empresa con mayor producción argentífera, registró un crecimiento de 8.6%. Sin embargo, los resultados negativos obtenidos en el mes por parte de Compañía de Minas

Buenaventura S.A.A. (-5.9%) y Compañía Minera Antamina S.A. (-21.7%) contribuyeron a que en el acumulado enero - mayo de 2018, la producción de plata registre una caída de 2%.

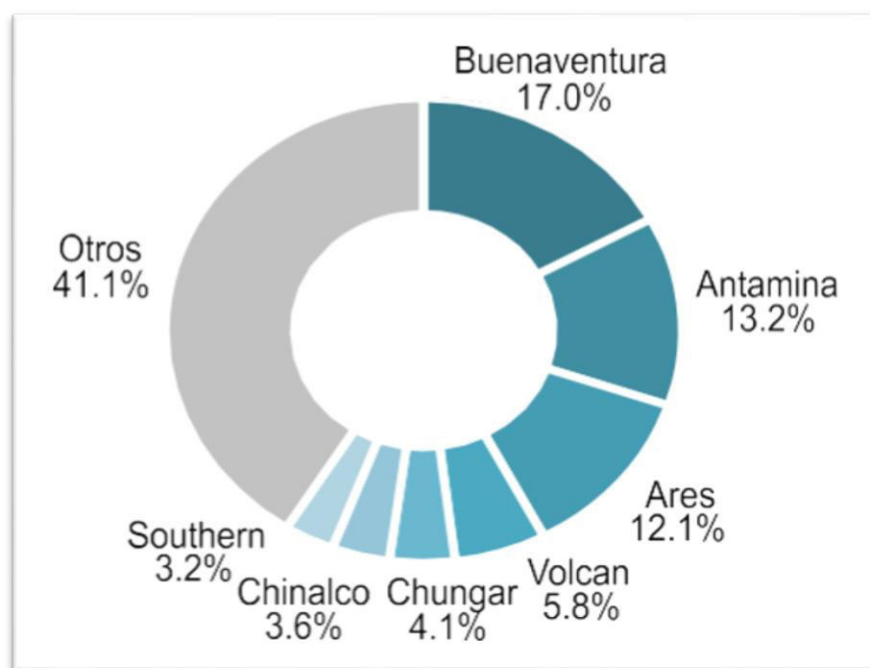
A nivel regional, Junín desplazó a Lima como la primera región productora de plata con una participación de 16.9% frente al 16.7% que representó esta última. Asimismo, Áncash se mantuvo en el tercer lugar representando el 16.3% del total. [8, Ministerio de Energía y Minas - 2018.]

Figura 3. *Producción mensual de plata (TMF)*



Fuente: Declaración Estadística Mensual (ESTAMIN) - Ministerio de Energía y Minas (MINEM)-2018.

Figura 4. Estructura de la producción de plata por empresas, enero-mayo 2018



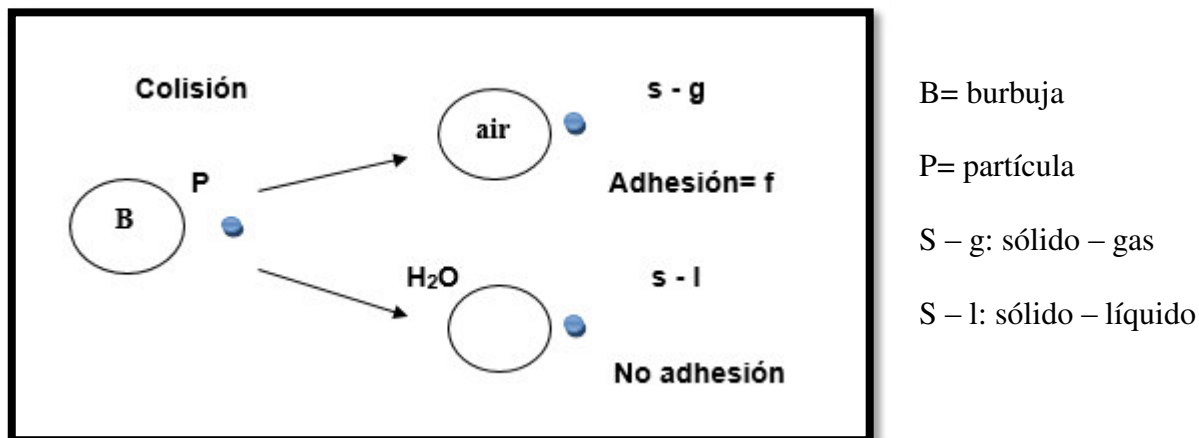
Fuente: Declaración Estadística Mensual (ESTAMIN) - Ministerio de Energía y Minas (MINEM)-2018.

3.5. La flotación

3.5.1. Generalidades

La flotación en espuma, es un método físico-químico de concentración de minerales finalmente molidos, que aprovecha la diferencia entre las propiedades superficiales o interfaciales del mineral útil y la ganga. [10, Marsden, John; House, Lain. 1960]

Figura 5: Diferencia entre las propiedades del mineral útil y la ganga



Fuente: Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio (2012).

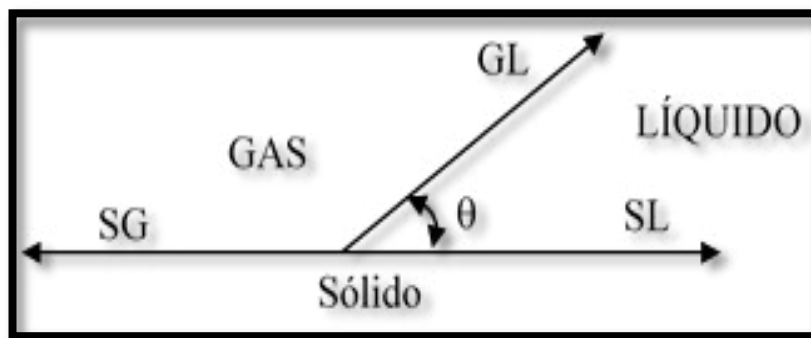
El proceso comprende el tratamiento químico de una pulpa de mineral a fin de crear condiciones favorables para la anexión de ciertas partículas minerales a las burbujas de aire. Estas burbujas de aire llevan consigo los minerales seleccionados a la superficie de la pulpa y forma una espuma estabilizada que es recogida mientras los otros minerales permanecen sumergidas en la pulpa y constituyen las colas o relaves. [10, Marsden, John; House, Lain. - 1960]

La flotación de un sólido depende de la relativa adsorción ó mojado de sus superficies por un fluido. A su vez este proceso viene gobernado por la energía de interfase, en la que la tensión superficial es el factor decisivo. Cualquier superficie, tal como la que separa el agua y el aire, se comporta exactamente como si se hallara en tensión. Esta tensión superficial es la que induce a las pequeñas masas de agua en el aire a tomar la forma esférica o de gota y a las pequeñas masas de aire en el agua a adquirir forma esferoidal y convertirse en burbujas, ya que la esfera es el

cuerpo que ofrece el mínimo de superficie por unidad de volumen. [10, Marsden, John; House, Lain. - 1960]

La tensión interfacial puede medirse como la fuerza de resistencia que se opone a la ampliación o agrandamiento de la superficie. Su valor queda determinado por el ángulo formado entre las superficies, el cual debe ser igual a cero. Si una de las fases es un sólido y las otras dos fases son fluidos, el equilibrio de fuerzas paralelas a la superficie del sólido conduce a la igualdad; según la figura [10, Marsden, John; House, Lain. - 1960]:

Figura 6. Tensión superficial de la burbuja de flotación.



Fuente: Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio (2012).

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} + \gamma_{LG} (\text{COSENO}\theta) = 0$$

Siendo:

γ = Tensión superficial entre las fases, indicadas por las letras iniciales utilizadas como subíndices.

θ = Angulo de contacto

G = gas

L = líquido

S = sólido

La fuerza de gravedad y la agitación tienden a desprender a las partículas sólidas de las burbujas. Si el ángulo de contacto es pequeño el líquido avanza sobre la superficie del sólido, pues las fuerzas de superficie que mantienen unidos al sólido y a la burbuja son débiles. Un ángulo de contacto grande significa una fácil flotabilidad. Cuando una partícula sólida se adhiere a una burbuja de aire, tiene lugar una pérdida de energía superficial, $-\Delta E$, por unidad de superficie (σ), que es igual a la disminución de la tensión superficial, es decir [10, Marsden, John; House, Lain. - 1960]:

$$\Delta E - \gamma_{SG} \Delta \sigma_{SG} + \gamma_{SL} \Delta \sigma_{SL} + \gamma_{LG} \Delta \sigma_{LG}$$

$$\Delta \sigma_{SL} = -\Delta \sigma_{SG} - \Delta \sigma_{LG}$$

$$\frac{-\Delta E}{\Delta \sigma_{SG}} = (\gamma_S + \gamma_{LG} - \gamma_{SG})$$

Ya que:

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} + \gamma_{LG} (\cos \theta) = 0$$

$$\gamma_{SL} - \gamma_{SG} = -\gamma_{LG} (\cos \theta)$$

$$\frac{-\Delta E}{\Delta \sigma_{SG}} = \gamma_{LG} (1 - \cos \theta)$$

Esta pérdida de energía ($-\Delta E$) es una medida de la facilidad de mojada (humectabilidad), es una indicación de su flotabilidad. Representa el trabajo exigido para separar el aire de la unidad de superficie de sólido. [10, Marsden, John; House, Lain. - 1960]

3.5.2. Etapas de la flotación

El proceso de flotación abarca las siguientes etapas [11, Astucuri, Venancio. 1982]:

- Molienda del mineral a un tamaño lo suficientemente fino para separar los minerales valiosos uno de otro, así como los minerales de ganga adherentes.
- Preparación de las condiciones favorables para la adherencia de los minerales deseados a las burbujas de aire.
- Crear una corriente ascendente de burbujas de aire en la pulpa del mineral.
- Formar una espuma cargada de mineral en la superficie de la pulpa.
- Extraer la espuma cargada de mineral.

Aunque la molienda del mineral no forma parte de la flotación, tiene una importante influencia sobre el proceso. Para lograr resultados óptimos en la flotación, en la etapa de molienda los minerales valiosos deben ser liberados completamente de la roca desechable (ganga) y ser separados unos de otros. Sin embargo, en la práctica a menudo esto no es económicamente factible y aun cuando se logra una separación completa pueden presentarse otros factores negativos para el proceso, por ejemplo los molinos de bolas o barras generalmente usados para la molienda pueden formar considerables lamas de ganga que complicarán las subsiguientes etapas de flotación. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

La creación de una corriente ascendente de burbujas de aire se logra con una máquina de flotación, la que produce burbujas bien sea mediante la agitación mecánica de la pulpa de mineral y/o la introducción directa de aire bajo presión. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Para obtener la adherencia de las partículas minerales deseadas a las burbujas de aire y de ahí, la formación de una espuma cargada de mineral en la superficie de la pulpa, se debe formar una película de superficie hidrofobia sobre las partículas a flotar y una película hidrofílica o humectable en todas las demás. Esto se logra por medio de colectores y modificadores; la

selección de la combinación apropiada para cada tipo de mineral particular, constituye precisamente el principal problema del metalurgista a cargo del beneficio. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

3.5.3. Flotación diferencial

Todos los procesos de concentración por flotación son selectivos o diferenciales, por cuanto un mineral o grupo de minerales son flotados para separarlos de la ganga que los acompaña. Ordinariamente, sin embargo, la separación de minerales distintos como los sulfurados de los no sulfurados se conoce como flotación colectiva o bulk y el término de flotación diferencial restringe a aquellas operaciones que comprenden la separación de tipos similares de minerales, ejemplo la concentración y subsiguiente separación de sulfuros de plomo, zinc y cobre de un solo mineral. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

3.5.4. Reactivos utilizados para la flotación de minerales

Los reactivos se emplean en la flotación con la finalidad de:

- Comunicar a determinadas especies minerales de una pulpa, propiedades que les permitan adherirse a las burbujas de gas.
- Dotar a las películas de estas burbujas de estabilidad.

Los agentes de flotación pueden clasificarse como:

- Colectores, Espumantes y Modificadores. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Colectores (promotores):

Reciben éstos nombres aquellos reactivos, que siendo adsorbidos sobre la superficie de la partícula sólida en forma de películas muy finas determinan un aumento del ángulo de contacto. La designación de promotor, se aplica particularmente a los agentes formadores de películas, tales como el xantato sódico NaS (CS) OR, el cuál es adsorbido por el sulfuro de plomo, el radical xantato (-SCS-) hacia el plomo y el radical (-R-) hacía el lado opuesto. Este hecho proporciona a la superficie del sólido la característica de asemejarse a un hidrocarburo, es decir que no es mojado por el agua. Se denomina colector, si el material adsorbido forma una película gruesa, el petróleo es un ejemplo de colector típico, pero tiene la desventaja de formar una espuma grasienta, difícil de romper en la operación posterior de sedimentación. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Espumantes:

Son necesarios para evitar la coalescencia de las burbujas de aire cuando llegan a la superficie del agua, manteniendo así una espuma persistente y de selectividad deseada. Un buen espumante debe tener la propiedad de trasladarse fácilmente a la interfase agua – aire, los espumantes más ampliamente usados son compuestos heteropolares y surfactantes, que contienen una parte polar o ávida de agua y otra no polar o ávida de aire. En la interfase agua – aire, los espumantes se orientan con el grupo polar hacia el agua y el grupo no polar hacia el aire. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Modificadores:

Los reactivos modificadores se usan para activar la capacidad de adsorción del reactivo formador de películas (colector o promotor), dichos agentes reaccionan con la superficie del sólido, bien sea por acción química o por adsorción y modifican el carácter de la superficie de

uno o más sólidos, lo que perturba la adsorción por ellos del agente colector o promotor. Los modificadores pueden actuar como:

Depresores.

Son aquellos reactivos que inhiben o impiden la adsorción de un colector por una partícula de mineral, impidiendo por lo tanto su flotación. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Activadores.

Se utilizan para aumentar la capacidad de adsorción del reactivo formador de películas (colector o promotor). [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Agente regulador de pH.

El grado de acidez o pH del agua, constituye un factor de gran importancia, ya que regula o modifica la formación de películas y en muchos casos, la flotación solo es posible dentro de una estrecha zona de valores de pH. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

3.5.5. VARIABLES DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE FLOTACIÓN

Granulometría:

Adquiere gran importancia dado que la flotación requiere que las especies minerales útiles tengan un grado de liberación adecuado para su concentración. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Tipo de reactivos:

Los reactivos pueden clasificarse en colectores, espumantes y modificadores. La eficiencia del proceso dependerá de la selección de la mejor fórmula de reactivos. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Dosis de reactivo:

La cantidad de reactivos requerida en el proceso dependerá de las pruebas metalúrgicas preliminares y del balance económico desprendido de la evaluación de los consumos. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Densidad de pulpa:

Existe un porcentaje de sólidos óptimo para el proceso, que tiene influencia en el tiempo de residencia del mineral en los circuitos de flotación. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Aireación:

La aireación permitirá aumentar o retardar la flotación en beneficio de la recuperación o de la ley, respectivamente. El aire es uno de los tres elementos imprescindibles en el proceso de flotación, junto con el mineral y el agua. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Regulación del pH:

La flotación es sumamente sensible al pH, especialmente cuando se trata de flotación selectiva. Cada fórmula de reactivos tiene un pH óptimo ambiente en el cual se obtendría el mejor resultado operacional. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Tiempo de residencia:

El tiempo de residencia dependerá de la cinética de flotación de los minerales de la cinética de acción de reactivos, del volumen de las celdas, del porcentaje de sólidos de las pulpas en las celdas y de las cargas circulantes. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

Calidad del agua:

En las plantas metalúrgicas la disponibilidad de agua es un problema. Normalmente se utiliza el agua de recirculación de espesadores que contiene cantidades residuales de reactivos y sólidos en suspensión. [11, Astucuri, Venancio. - 1982]

3.5.6. Flotación del oro

La flotación de minerales auríferos tradicionalmente ha operado para la hidrofobización del complejo pirita-oro en las menas auríferas, dada las asociativas que ocurre en los depósitos de oro en los cuales el oro está microestructuralmente ligado a los granos de pirita, básicamente en las fronteras de grano.

La mineralogía de los minerales auríferos y de la ganga acompañante, el tipo de perfil de liberación de los minerales auríferos después de que la mena se somete a procesos de reducción de tamaño y el tamaño de las partículas de oro, constituyen los factores más importantes para determinar el mejor método de procesamiento de un mineral aurífero.

La composición mineralógica de una mena es muy importante, cuando se considera su procesamiento por flotación, tanto desde el punto de vista de los reactivos a emplear como de la configuración de los dispositivos de flotación. Aparte de una adecuada selección del colector,

también es importante determinar si cualquiera de los minerales de ganga es susceptible de hidrofobizarse y por lo tanto será necesario considerar el empleo de depresores. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

La flotación es uno de los procesos más importantes en la actualidad, para la recuperación de oro asociado a sulfuros, principalmente a pirita, y se proyecta como uno de los procesos que puede remplazar la amalgamación con mercurio para la recuperación de oro nativo. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

La recuperación de oro nativo relativamente grueso (hasta 200 μ) por medio de la flotación, ha sido investigada por algunos autores, sin embargo existen algunas imprecisiones respecto al comportamiento hidrofóbico del oro nativo y su relación con la razón de aspecto de algunas partículas auríferas que por su maleabilidad poseen la tendencia a configurarse de forma aplanada (escamas) lo cual provee a las partículas de áreas suficientemente grandes como para alcanzar flotabilidad mecánica en los equipos de recuperación. A manera de ejemplo, es el caso de las partículas de oro aluvial que son naturalmente escamosas y que han sufrido mucha deformación por trabajo mecánico de aplastamiento durante su formación de la roca huésped y transporte hasta la ubicación final del depósito. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Considerando el hecho de que el oro nativo y el electrum tienen composición variable y diferentes partes de una misma partícula podrían presentar diferentes composiciones, la recuperación por flotación de estas partículas es posible siempre y cuando se resuelva desde el punto de vista de la superficie la heterogeneidad del comportamiento hidrofóbico que genere la

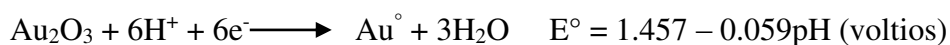
recuperación de soluciones sólidas de oro nativo tales como el electrum. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

El oro nativo es una aleación de composición no especificada no necesariamente uniforme y de ocurrencia natural que contiene alrededor del 80% al 100% de oro, del 1% al 15 % de plata y entre el 0% y el 5 % de cobre. Por su parte el electrum se definió originalmente como una aleación equi-estequiométrica de oro y plata, pero en el uso corriente significa prácticamente cualquier aleación oro-plata rica en ésta última. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Los aspectos más importantes en la flotación de oro nativo son:

- *Superficie química del oro y su flotabilidad natural*

En un medio acuoso no-complejante, el oro es no reactivo debido a que los iones de oro y sus óxidos son termodinámicamente inestables, se requieren fuertes condiciones oxidantes para su formación [11, Astucuri, Venancio. - 1982]:



La quimisorción de oxígeno sobre el oro inicia a potenciales por encima de los 1.4 Voltios con monocapas de recubrimiento alcanzadas a 2.0 voltios. Lo anterior es atribuido al crecimiento, en soluciones ácidas, de una capa de Au_2O_3 y de $\text{Au}(\text{OH})_3$ en soluciones alcalinas. Los estudios de voltamperometría han determinado que los rangos de estos crecimientos dependen de la orientación de los cristales y las impurezas presentes. El oro puro, de superficies limpias es naturalmente hidrofílico, no obstante, las pequeñas capas de contaminantes

carbonáceos, depositadas del aire o soluciones, son suficientes para volverlo hidrofóbico, como resultado de ello el oro es uno de los componentes naturales más hidrofóbico en los sistemas de extracción. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Por otro lado el fenómeno de flotación natural del oro nativo de algunas menas ha sido observado y reportado en la literatura científica, pero no existe acuerdo entre las explicaciones diversas dadas a este fenómeno. Los experimentos con oro electroquímicamente limpios en su superficie mostraron que posee un ángulo de contacto cero en soluciones buffer y ninguna flotación natural en soluciones ácidas o alcalinas. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Se ha encontrado que si el oro forma una aleación con una pequeña cantidad de plata o cobre, la adsorción del colector aumenta significativamente, ya que la plata tiene un efecto positivo sobre la flotabilidad del oro, dado que en presencia de plata, la adsorción de ditiofosfatos y monotiofosfatos (DTPI y MTPI) se indica por la formación de los correspondientes complejos de plata (Ag-DTPI y Ag-MTPI) que pueden ser determinados por espectroscopia IR y que conducen a mejorar las condiciones de flotación. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Afortunadamente casi todo el oro que se obtiene en forma natural contiene plata, normalmente en el intervalo de 2% al 12%, y esto es suficiente para una buena adsorción de un colector y para la flotación. Cabe añadir que otros elementos como el cobre y el telurio también aparecen frecuentemente asociado al oro nativo y como resultado general, se puede decir que el oro es un mineral que presenta una alta susceptibilidad de ser hidrofobizado selectivamente. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Un aspecto muy importante es la forma de la partícula de oro, este factor afecta a la flotación debido a que las partículas de oro aplanado tienen una mejor área superficial y pueden reaccionar de manera más eficiente con el colector y su acción fijadora es mucho más lenta comparada con pepitas pequeñas o partículas redondeadas. Por ello la acción trituradora tiene dos acciones importantes, liberar las partículas de oro y crear una superficie adecuada para el colector.

El oro nativo también podría adquirir una flotabilidad por contaminación de su superficie con materia orgánica procedente de procesos biológicos naturales, particularmente en menas de placer. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

- *El efecto del tamaño de partícula*

El tamaño de partícula tiene un gran efecto sobre la recuperación de oro mediante flotación debido a su alta densidad. La flotación es efectiva para partículas de oro en el intervalo de 20-200 μm . Para tamaños más finos la selectividad del oro decrece debido a la flotación de minerales ganga. Para tamaños de partícula más gruesos la flotación debe realizarse con altas densidades de la mezcla (35% sólidos) dado que esto reduce el tamaño de partícula de la sedimentación. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

La recuperación disminuye para tamaños pequeños, lo cual se relaciona con la dificultad de adhesión partícula/burbuja, debido a que éstas no adquieren la energía cinética suficiente para producir un agregado partícula/burbuja estable. Por otra parte, las partículas pequeñas son arrastradas más fácilmente a la espuma, ya que el drenaje a la pulpa se favorece con el incremento de la velocidad de sedimentación. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Es importante destacar que, en la etapa de flotación primaria (etapa “rougher”) la flotación se realiza con una granulometría de mena en la cual no es necesaria la liberación total de las partículas de oro, sin embargo, en la etapa de limpieza donde es necesaria la selectividad de las partículas útiles, es fundamental realizar una remolienda del concentrado de la etapa “rougher” para la liberación de las especies útiles de la mena. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

De esta manera, el tamaño de partícula es la variable sobre la cual debe ponerse más énfasis en su control, debido a su efecto en la recuperación metalúrgica y en la selectividad del concentrado final, así como, por la alta incidencia que tiene en los costos de operación del proceso global de concentración. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Selección de colector y dosificación.

La función del colector es hacer hidrofóbica la superficie del mineral deseado, por lo cual, es el reactivo químico más importante utilizado en la flotación. La amplia experiencia existente en la flotación de minerales permite usar con eficiencia determinados tipos de colectores dependiendo de los tipos de minerales y asociaciones mineralógicas presentes. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Actualmente existen muchos colectores para la flotación de oro nativo y electrum, pero usualmente se prefieren los xantatos y los ditiofosfatos, o mezclas de ellos. En aplicaciones en las que el oro nativo se presenta conjuntamente con oro submicrométrico y en general oro no liberado incluido en sulfuros minerales, la combinación de estos reactivos se ha mostrado eficiente tanto para la recuperación de los sulfuros como del oro nativo; posteriormente puede

aplicarse cianuración a los concentrados para obtener el oro. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

A pesar del empleo exitoso y ampliamente documentado de los xantatos y ditiofosfatos en la flotación de oro, estudios realizados industrialmente proponen el uso de colectores apolares e insolubles en agua tales como los tiocarbamatos, los mercaptanos y los dialquil sulfuros y desaconseja el empleo de los colectores primero mencionados, argumentando que los xantatos y los ditiofosfatos rebajan la tasa de flotación de todos los minerales naturalmente hidrofóbicos, entre ellos el oro, además de que requieren mayores dosis para lograr la hidrofobicidad. Una razón adicional para ello, es que el uso de colectores no polares preserva la selectividad en la flotación de las especies naturalmente hidrofóbicas. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Por otra parte otros estudios realizados sugieren que las partículas de oro libre pueden recuperarse muy selectivamente, especialmente contra pirita, manteniendo las superficies del oro limpias de lodos y de especies orgánicas, sin el uso de reguladores de pH y con pequeñas o cero dosis de colectores apolares. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Se debe tener en cuenta, que los reactivos de flotación requieren de un cierto tiempo de acondicionamiento para estar en contacto con la pulpa y de esa forma poder actuar en forma eficiente sobre las especies útiles de la mena. Así, la etapa de acondicionamiento adquiere mucha importancia, ya que algunos reactivos se deben adicionar en la etapa de molienda para tener mayor contacto con la mena, mientras que otros, se adicionan directamente al cajón de descarga de los molinos de bolas o al acondicionador. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Debido a efectos sinérgicos, actualmente, se prefiere trabajar con diferentes reactivos y proporción de los mismos, ya que aseguran que los beneficios de usar una mezcla de colectores se atribuye al incremento en la capacidad de carga de la fase espumante, una cinética más rápida y una recuperación exitosa de partículas intermedias y gruesas. Se infiere que es la interacción entre los componentes del sistema de la mezcla de colectores más que el efecto principal individual es el que domina los beneficios del desempeño, estos a su vez incluyen: el aumento de las recuperaciones y el grado de metal pagado, así como, el incremento en la velocidad del tiempo de recuperación cuando se usan dosis más bajas de reactivos. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Tabla 5. Colectores para la flotación de oro

Composición de colector- colectores individuales	Nombre de Reactivos
Xantato isobutilico de sodio	AERO-317
Xantato amílico de potasio	AERO-343
Formulación de formato de xantogeno	AERO-3758
Di-isobutil dithiofosfato	AERO-3477
Mercaptanobenzothiozalato	AERO-404
Monothiofosfato	AERO-6697
Formulación dithiofosfato	Reactivo S-9810
Composición de colector-mezcla de colectores	Nombre de Reactivos
Formulación dithiofosfato/monothiofosfato	AERO-7249
Formulación monothiofosfato/ dithiofosfato	AERO-8761
Formulación dithiofosfato/monothiofosfato/ dithiofosfinato	Reactivo S-9913
Formulación dithiofosfato/mercaptanobenzothiozalato	AERO-405
Formulación dithiofosfato/mercaptanobenzothiozalato	AERO-7156
Formulación thionocarbamato/dithiofosfato	AERO-3926
Formulación thionocarbamato/dithiofosfato	AERO-473
Formulación modificada thionocarbamato/dithiofosfato	AERO 5744/5
Formulación dicresil dithiofosfato	Reactivo S-8985
Formulación modificada	Reactivo S-9889
Thionocarbamato/dithiofosfato/monothiofosfato	
Formulación de sulfuro etil octil	Reactivo S-701
Formulación dithiocarbamato/hidrosulfuro de sodio	Reactivo S-3730

Fuente: Bustamante Rúa, Moisés; Tobón Suárez, Claudia (2012)

Selección del Espumante

La elección de un espumante determina las características de la espuma, que contribuye a la selectividad de la operación. Se adicionan con el objeto de [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]:

- 1) Estabilizar la espuma
- 2) Disminuir la tensión superficial del agua
- 3) Mejorar la cinética de interacción burbuja – partícula
- 4) Disminuir el fenómeno de unión de dos o más burbujas (coalescencia).

La altura de la espuma y el flujo de aire a la celda, afectan el tiempo de retención de las partículas en la espuma. La estabilidad de la espuma depende principalmente de la dosificación del espumante. Los espumantes utilizados comúnmente en la flotación de oro nativo y electrum son aceite de pino, ácido cresílico, el MIBC (metil isobutil carbinol) y los oligómeros propileno glicol como el Aerofroth 65; colectores tales como el ditiofosfato líquido proveen también poder espumante a la pulpa mineral. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Las experiencias industriales, aportan a favor del uso de combinaciones de diferentes componentes de espumantes, con el objeto de maximizar la efectividad en la flotación de un amplio intervalo de tamaños de partículas. Éstos establecen que la mezcla de espumantes es ahora una práctica común dependiendo de la fortaleza y compacidad que se requieran en la espuma. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Para la flotación de oro nativo se recomiendan espumantes fuertes y estables.

Un requisito importante de un espumante es que no compita con los colectores disminuyendo la energía libre superficial de las partículas minerales y por lo tanto, si un espumante actuará

como colector se reduciría la selectividad del colector en uso. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

El Uso de Activadores

Para la flotación de oro nativo que presenta superficies limpias no se requiere adicionar activadores, no obstante eventualmente puede requerirse activación cuando existen recubrimientos en las partículas de oro u oro asociado con pirita recubierta. En tales casos suele emplearse sulfato de cobre, carbonato de sodio (el cual precipita calcio e iones de metales pesados), sulfuro de sodio en dosis controladas cuidadosamente, y dióxido de azufre. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

Los activadores son sales de metales base cuyo ión metálico se adsorbe sobre la superficie de las partículas minerales modificando sus propiedades químicas superficiales; como consecuencia, puede extenderse el intervalo de pH para la flotación mineral, y se incrementan la velocidad de flotación, la recuperación y la selectividad.

De otro lado existen ligandos que pueden formar complejos solubles con metales nobles como el oro en soluciones acuosas. Históricamente el ión CN^- es el ligando usado en la disolución de oro, otros ligandos que cumplen con dichas funciones son aquellos que contienen azufre, halógenos y nitrógeno. Entre éstos, los ligandos que contienen azufre son los más empleados para la recuperación de oro mediante flotación. [12, Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio - 2012]

3.6. Oxidación biológica o lixiviación bacteriana

El empleo de sistemas biológicos en los procesos industriales, conocido como biotecnología, ha sido usado desde tiempos inmemoriales en la producción de vino, cerveza, en la fabricación

de antibióticos, en la industria alimentaria, entre otras aplicaciones. En el sector minero metalúrgico, la biotecnología ha sido utilizada como una herramienta en la disolución y recuperación de los valores metálicos contenidos en las menas. Mayormente, los procesos microbianos han sido empleados en la lixiviación de cobre y uranio, en el mejoramiento de la extracción de metales preciosos contenidos en sulfuros refractarios y en el tratamiento de aguas residuales [13, Viñas R. Aranibar A. - 2006]

Muchos de los depósitos de oro y plata están a menudo asociados con minerales sulfurados, tales como la piritita y arsenopiritita. Estos minerales presentan resistencia a la recuperación de los metales preciosos. La facilidad con la cual el oro puede ser extraído, está relacionado con el tamaño de grano y su manera de distribución dentro del mineral, en la mayoría de los casos un porcentaje significativo de oro puede ocurrir en forma submicroscópica o en solución sólida con piritita. El oro que se encuentra como partículas submicroscópicas en los granos de piritita y arsenopiritita, según pruebas basados sobre técnicas microscópicas, indicaron que algo de 50% del oro estuvo incluido en la piritita y 20% en la arsenopiritita con un 30% de oro libre. Con el advenimiento de las técnicas sofisticadas, usando el microscopio electrónico de barrido, ahora hay evidencia que la mayor parte del oro esta debajo de un rango de 0,2 micrones de tamaño. El encapsulamiento de las partículas de metal precioso en esta manera, hace su extracción muy dificultosa, debido a que estos metales son inaccesibles a las soluciones lixiviantes, tales minerales son conocidos como minerales refractarios. Para lograr una recuperación satisfactoria de los metales preciosos es necesario primero romper los cristales de sulfuro para liberarlos, antes de aplicar un tratamiento convencional. Por ejemplo la tostación ha sido usada como una etapa de pre-oxidación antes de la cianuración. Sin embargo, las regulaciones del control de la polución y la fusión de la plata, los cuales forman escorias, hacen a la tostación no atractiva. Una

molienda de partícula a tamaño fino ayuda a la liberación de los metales preciosos, pero todavía da una recuperación insatisfactoria y conduce al consumo alto de reactivos en el proceso de extracción a causa del incremento del área de superficie. Como el tamaño de la partícula de los metales preciosos en el interior de la matriz sulfurosa puede estar en el rango desde unos cuantos micrones a submicrones, la molienda llega a ser costosa y una ruta no atractiva.

Una alternativa para tales minerales refractarios es la lixiviación bacteriana o biolixiviación seguida por cianuración. La biolixiviación disuelve a la matriz del sulfuro, así expone los metales preciosos encapsulados a la solución de lixiviación [13, Viñas R. Aranibar A. - 2006]

Lixiviación bacteriana, también conocida como Biolixiviación, puede ser definida como un proceso natural de disolución que resulta de la acción de un grupo de bacterias, principalmente del género *Thiobacillus Ferrooxidans*, con habilidad de oxidar minerales sulfurados, permitiendo la liberación de los valores metálicos contenidos en ellos. Por lo tanto la biolixiviación es una tecnología que se emplea bacterias específicas para lixiviar o extraer un metal como uranio, cobre, cinc, níquel y cobalto presentes en las menas. De otro lado, el termino biolixiviación es utilizado para describir un proceso que emplea bacterias para degradar un sulfuro, usualmente pirita (FeS_2) y arsenopirita (FeAsS_2), en el que el oro ó la plata, o ambos se encuentran encapsulados. [13, Viñas R. Aranibar A. - 2006]

3.6.1. Aspectos microbiológicos:

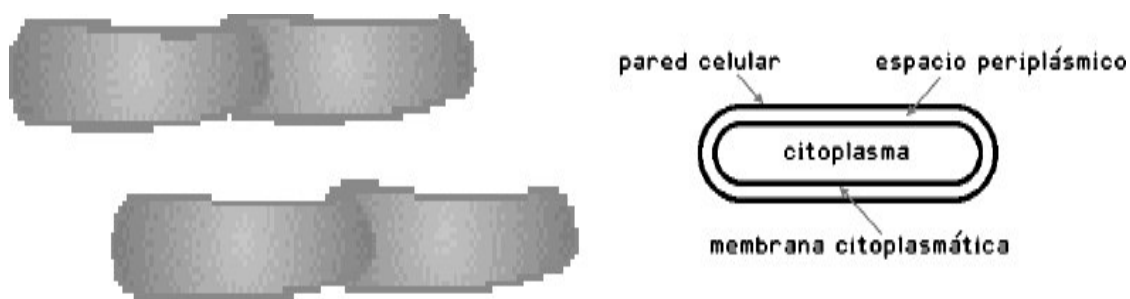
Bacterias: Thiobacillus ferrooxidans:

Los microorganismos que son responsables de la disolución de los metales a partir de minerales son, principalmente, organismos quimiosintéticos y autotróficos pertenecientes al género *Thiobacillus*, aunque no es la única. De las especies de *Thiobacillus* que se conocen la

que más atención ha recibido es *Thiobacillus ferrooxidans*, cuya presencia fue demostrada por Colmer y Hinkle, a comienzos de los años 50, en el drenaje unas minas de carbón, que reportaban altos contenidos de ácido y fierro.

T. ferrooxidans presenta forma bacilar, gran negativas, de 0,5 a 1,7 μ , algunas cepas tienen flagelos, es quimioautotrófico, capaz de oxidar compuestos inorgánicos como iones ferroso (Fe(II)) y azufre, los que le sirven de fuente primaria de energía. El carbono necesario para su arquitectura celular lo obtiene por fijación de CO₂, de manera similar a las plantas verdes (Ciclo de Calvin-Benson). Es aerobio (requiere de O₂ como aceptor final de electrones), acidófilo (desarrolla en rangos de pH que varían entre 1,5 y 3,0), y a temperaturas que oscilan entre 25-35°C. Es considerada como el mayor contribuyente en la producción de aguas ácidas que drenan de depósitos de metales sulfurados, gracias a la capacidad que tienen de oxidar minerales de disulfuro de fierro, generando soluciones ácidas de sulfato férrico.

Figura 7: Bacteria y sus principales componentes



THIOBACILLUS FERROOXIDANTS

Fuente: Marsden, John; House, Lain. (1960)

Las bacterias son organismos unicelulares, como se muestran en la figura 7, ellas están constituidas por elementos subcelulares de morfología y estructura bien definida. Entre estos elementos o partes de los microorganismos se distinguen: pared celular, la membrana citoplasmática y algunas estructuras membranosas que cumplen funciones respiratorias. Las bacterias en general se clasifican según su modo de nutrirse en:

Autotróficas, capaces de sintetizar todos sus nutrientes como proteínas, lípidos y carbohidratos, a partir del CO_2 .

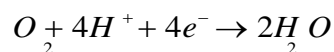
Heterotróficas, estas requieren carbohidratos como la glucosa para formar sus propios nutrientes. Mixotróficas, estas tienen la habilidad de formar sus propios nutrientes a partir de dióxido de carbono y carbohidratos.

Las bacterias también se clasifican según el modo de respirar, en:

- Aeróbicas, requieren de oxígeno para su respiración.
- Anaeróbicas, se desarrollan en medios exentos de oxígeno.
- Facultativas, estas son capaces de poder desarrollarse tanto en medios aeróbicos y anaeróbicos.

Las bacterias que intervienen en los procesos de lixiviación son generalmente autotróficas y aeróbicas. Las bacterias que son capaces de catalizar reacciones de oxidación en sustancias inorgánicas, como son los minerales, son generalmente clasificadas como quimio-lito-autotróficas o bien quimiosintéticas. Es decir, tienen la facultad de obtener la energía necesaria para desarrollar su metabolismo energético a partir de la oxidación de compuestos inorgánicos, es decir a partir de intercambio de electrones, fundamentalmente a partir de la oxidación de sulfuros metálicos, de la oxidación del ión ferroso o bien de la oxidación del azufre elemental. La

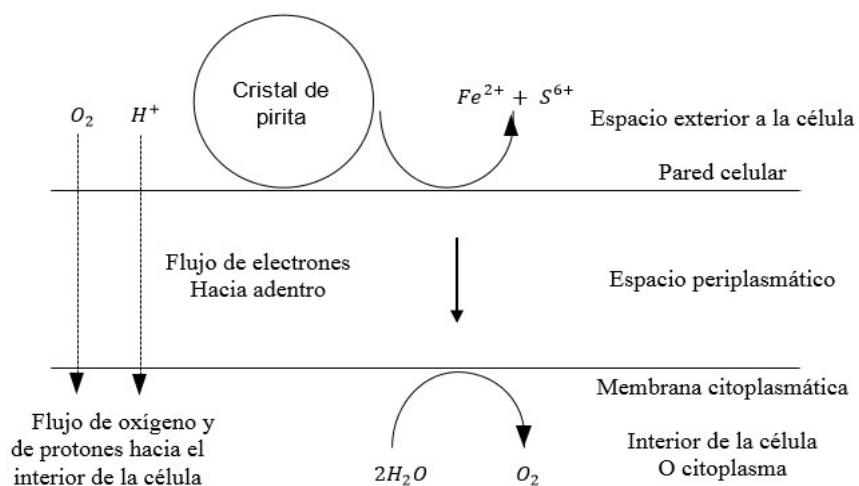
reacción de oxidación del ión ferroso, de los sulfuros metálicos o de los compuestos de azufre es catalizada por la bacteria, mientras que el oxidante (o receptor terminal de los electrones) es normalmente el oxígeno molecular que por efectos penetra en el interior de la membrana citoplasmática. En este caso estaremos hablando de una oxidación en condiciones aeróbicas. El oxígeno es reducido a agua según la reacción:



Un esquema de oxidación de un cristal de la pirita, catalizada por bacterias, se muestra en la figura 8.

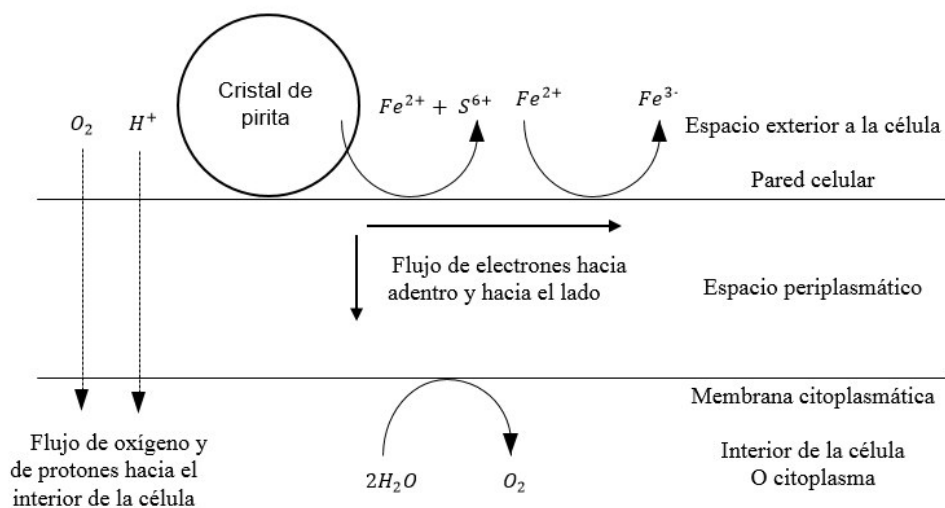
Por otra parte, también se puede dar una oxidación siempre catalizadas por las bacterias, en condiciones anaeróbicas, es decir, sin oxígeno; o bien unas condiciones mixtas: aeróbicas y anaeróbicas. En estos casos el oxidante (o receptor de electrones), además del oxígeno puede ser el ión férrico. Se observa en la figura 8, esta otra situación siempre asumiendo el caso de la oxidación de un cristal de pirita, catalizada por bacterias [6, Marsden, John; House, Lain. - 1960].

Figura 8: Representación esquemática de la oxidación, catalizada por bacteria, de un cristal de pirita (FeS₂) en condiciones aeróbicas.



Fuente: Marsden, John; House, Lain. (1960)

Figura 9: Representación esquemática de la oxidación catalizada por la bacteria, de un cristal de pirita en condiciones mixtas: aerobia y anaeróbica.



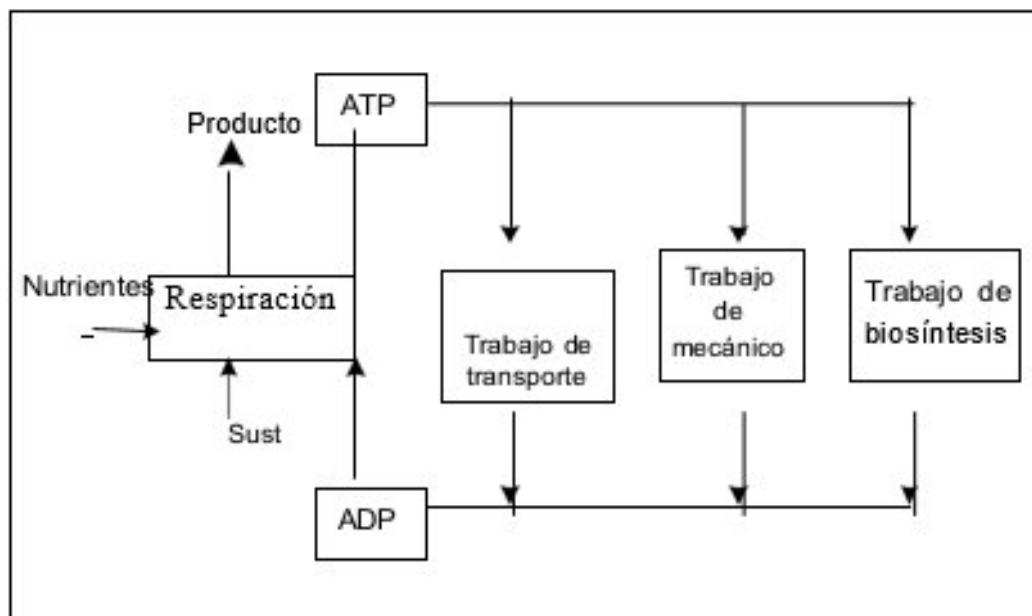
Fuente: Marsden, John; House, Lain. (1960)

3.6.2. Transferencia de energía en sistemas biológicos

Un problema de vida es la transferencia de energía desde una fuente al organismo y la utilización de parte de esa energía para su crecimiento multiplicación y otros procesos biológicos. Compuestos fosforosos están generalmente reconocidos que juegan un rol universal en los fenómenos de transferencia de energía.

La energía metabólica de la oxidación del sustrato se transfiere al ATP (Adenosine Triphosphate). El ATP cargado entonces transporta la energía bioquímica a todas partes de la célula donde la energía puede ser requerida para la síntesis y mantenimiento. La energía del ATP es utilizado en la célula para trabajo de transporte, trabajo mecánico y biosíntesis, y en este proceso el ATP es hidrolizado a ADP (Adenosine Diphosphate) más fosfato inorgánico. [13, Viñas R. Aranibar A. - 2006]

Figura 10: Utilización de energía por microorganismos



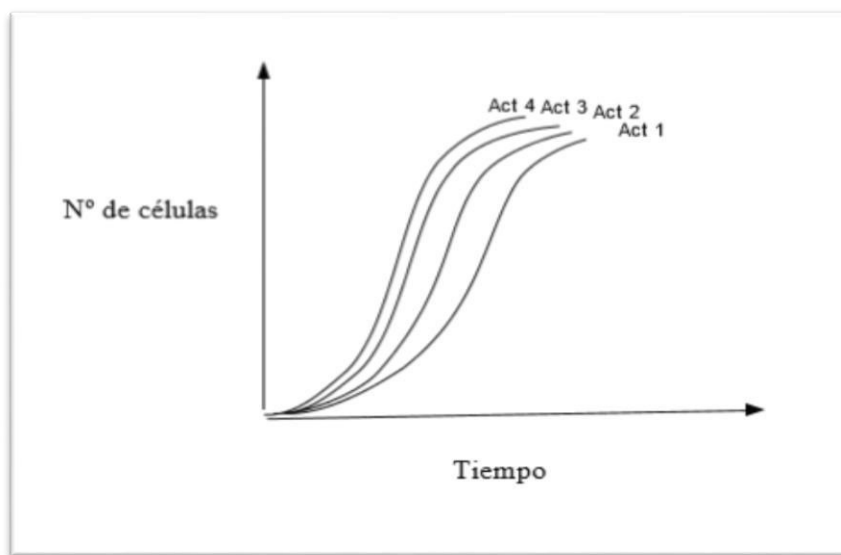
Fuente: Villas C., Roberto; Sánchez, Mario. (2006)

3.6.3. Adaptación de bacterias

La actividad bacteriana se mejora efectuando repetidos cultivos sobre el mismo sustrato. Este seguimiento está ilustrado en la figura 1.5 Mediante una adaptación se logra:

- Una disminución del tiempo muerto (tiempo improductivo)
- Aumento del grado de extracción del metal
- Incremento de la velocidad de extracción

Figura 11: Curvas de adaptación de bacterias

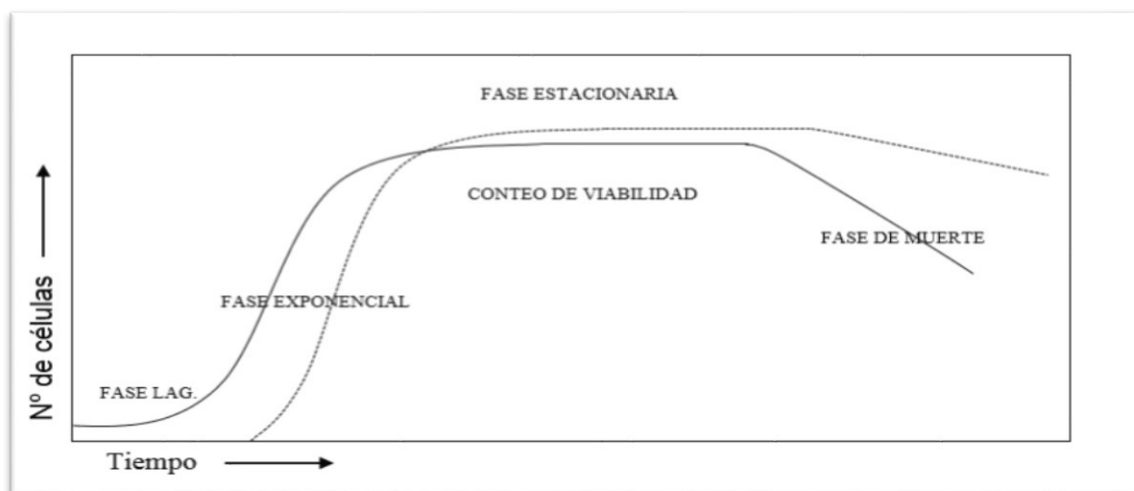


Fuente: Marsden, John; House, Lain. (1960)

3.6.3.1. *Crecimiento bacteriano*

El ciclo de vida de una colonia de bacterias inoculadas en un medio de cultivo (9K) puede representarse mediante el esquema de la figura 12.

Figura 12. Fases de crecimiento bacteriano



Fuente: Marsden, John; House, Lain. (1960)

En este esquema se muestra en primer lugar un periodo inicial de crecimiento lento o "etapa de acostumbramiento" al nuevo medio, que se caracteriza por muy poca actividad bacteriana mientras la bacteria se acostumbra y desarrolla los niveles.

La segunda fase es la "etapa de crecimiento exponencial". En la que la bacteria se multiplica exponencialmente por división binaria. Esta fase de la vida de una colonia de bacterias se distingue de las demás y se le denomina "periodo de duplicación" y que corresponde al tiempo que demora en duplicarse la población bacteriana, bajo ciertas condiciones estandarizadas.

La tercera fase corresponde a la limitación de la velocidad de solubilización o de crecimiento de la población, debido al agotamiento de uno o más de los nutrientes esenciales o que los

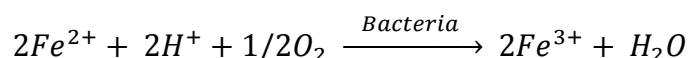
subproductos de su propia actividad envenenan su ambiente provocando su inhibición, esta etapa se denomina "etapa estacionaria". La población bacteriana en esta etapa consiste en su totalidad de células completamente variables pero su crecimiento está limitado. En cambio al entrar a la cuarta fase, comienza a disminuir la población de bacterias y se entra de lleno a un decaimiento motivado por el cual esta etapa se conoce como "fase de muerte". Esto indica que el punto adecuado de efectuar la transferencia de cultivo a otro está precisamente en la fase de crecimiento exponencial. [6, Marsden, John; House, Lain. - 1960]

3.6.4. Mecanismos de la biolixiviación:

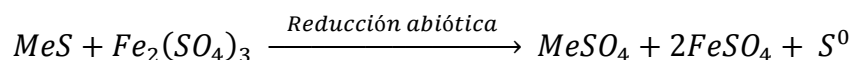
Los mecanismos de reacción generalmente utilizados en el proceso biogénico de minerales sulfurados son de dos tipos:

Mecanismo indirecto: Requiere de la presencia de hierro disuelto en las soluciones:

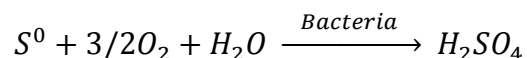
Reacción aeróbica 1:



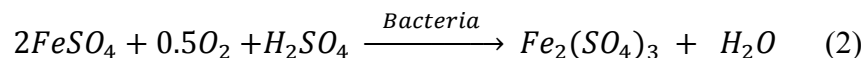
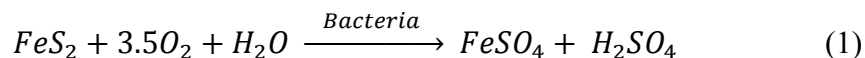
Reacción anaeróbica:



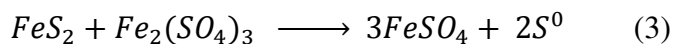
Reacción aeróbica 2:



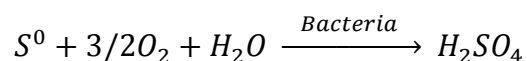
Para la pirita:



El sulfato férrico es un oxidante fuerte capaz de disolver una amplia variedad de minerales sulfurados. La lixiviación con $Fe_2(SO_4)_3$ recibe el nombre de lixiviación indirecta porque se realiza en ausencia de oxígeno o de bacterias y, es responsable de la disolución de varios minerales sulfurados, como la pirita:-

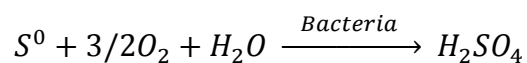
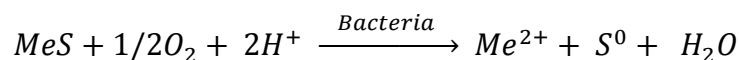


El mecanismo, lixiviación indirecta depende de la regeneración biológica del sulfato férrico (reacción 2). El azufre (S^0) generado en la reacción 3 puede ser transformado en ácido sulfúrico por T. Ferrooxidans según:

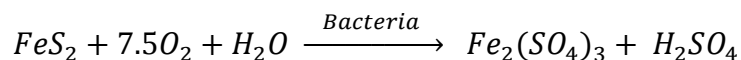


En el mecanismo de contacto indirecto el ion férrico (Fe^{3+}) oxida al sulfuro metálico, produciéndose ion ferroso (Fe^{2+}) y el azufre elemental (S^0), que a su vez son reoxidados por las bacterias regenerando el ion férrico y produciendo así ácido sulfúrico. [2, Guido Nanetti Sandoval y Jose Robles Valenzuela. - 1997]

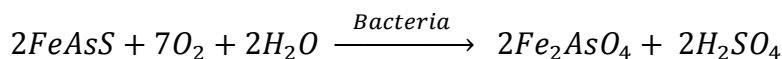
Mecanismo directo: Implica la adhesión de la bacteria directamente sobre los cristales del sólido, actuando ella como puente para el traspaso de electrones, es decir, las bacterias T. Ferrooxidans también pueden lixiviar sulfuros metálicos directamente si la participación del sulfato férrico producido biológicamente. [3] El proceso se describe en la siguiente reacción:



Para la Pirita:



Para la arsenopirita:



Dado que el hierro siempre está presente en ambiente de lixiviación natural, es posible que tanto la lixiviación indirecta como la directa ocurran de manera simultánea. [2, Guido Nanetti Sandoval y Jose Robles Valenzuela. - 1997]

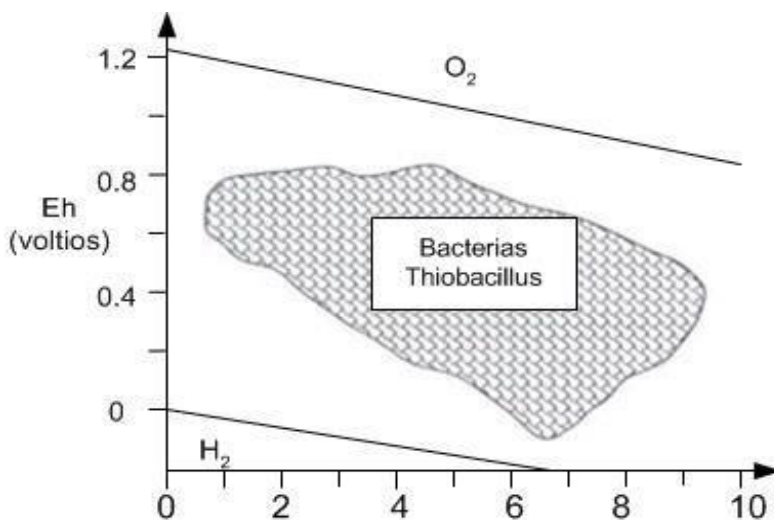
Factores que tienen influencia en la actividad bacterial

La actividad metabólica de los microorganismos incluidos en la lixiviación de sulfuros está afectada considerablemente por factores ambientales, entre las que podemos mencionar: Eh, pH, temperatura, presión, concentración de nutrientes, tamaño de partícula o área de superficie del sustrato entre otros.

3.6.5. Efecto del medio ambiente

Los límites de actividad bacterial en el ambiente natural se han estudiado en términos de pH y el potencial de oxidación - reducción. La escala Eh se extiende desde +850 a -190 mV, mientras que los rangos de pH son de 1,0 a 9,2. En el diagrama de Pourbaix (9) se muestran áreas de actividad para bacterias *Thiobacillus Ferrooxidans*.

Figura 13. Áreas de actividad de bacterias *Thiobacillus Ferrooxidans* .



Fuente: Álvarez Q., Armando. (2006)

3.6.5.1. Efecto de la temperatura

La temperatura óptima para el *T. Ferrooxidans* está en el rango de 25 a 45°C. La oxidación biológica de sulfuros metálicos por el *T. Ferrooxidans* cesa alrededor de 50°C y mayor temperatura solamente una oxidación química ocurre. Una temperatura mínima no ha sido establecida para el crecimiento de *T. Ferrooxidans* pero generalmente se acepta que la actividad bacterial aún puede darse a 10°C

La existencia de la vida para el *T. Ferrooxidans* es también dependiente de las radiaciones naturales que existen en el medio ambiente. Los *T. Ferrooxidans* son sensitivas a la radiación y los mejores resultados para su crecimiento se obtienen bajo la oscuridad.

3.6.5.2. Efecto del pH

La oxidación biológica del ión ferroso y de sulfuros incluye movimientos de iones hidrógeno así como de electrones, el pH tiene un efecto definido. La influencia de pH sobre la actividad de las bacterias *T. Ferrooxidans* a sido estudiado por investigadores en el rango de 1 a 5. Pero han

reportado valores óptimos de pH en el rango de 2,3 y 2,5 para la chalcopirita, sulfuro de zinc, covelita y hierro ferroso.

La apariencia simple del proceso bacterial, tropieza en la práctica con propiedades de los minerales y medio ambiente variables en un amplio rango constituyendo por lo tanto cada yacimiento un problema particular que requiere ser estudiado separadamente.

3.6.5.3. Efecto de los nutrientes

Los nutrientes que requieren el T. Ferrooxidans son los mismos que utiliza un autótrofo quimiosintético. El medio de cultivo que se usan más frecuentemente es el 9k y su composición se muestra en la tabla 6.

El T. Ferrooxidans sintetiza sus materiales celulares a partir de fuentes inorgánicas que son: dióxido de carbono (como fuente de carbón para el crecimiento de la célula), sulfato de amonio y fosfato ácido de potasio (como fuente de nitrógeno y fosfato), cloruro de potasio (como factores de crecimiento)

La fuente de energía utilizada por el T. Ferrooxidans son los iones ferrosos (Fe^{2+}) y azufre inorgánico. Esta energía como efecto de la oxidación del ión ferroso a ión férrico, es utilizada para su metabolismo. Esta oxidación se muestra en el cambio de color de la solución nutriente y comprueba de este modo el límite de la concentración para la dilución de un cultivo.

Tabla 6. Componentes para el medio de cultivo de las bacterias T

Componentes	Cantidades (g/L)
Medio Basal (NH ₄) ₂ SO ₄	(*) 3,00
K ₂ HPO ₄	0,50
MgSO ₄ 5H ₂ O	0,50
KCl	0,10
Ca(NO ₃) ₂	0,01
Fuente de energía	(**)
FeSO ₄ 7H ₂ O	50,0

(*) Medio de cultivo 9k (Silverman, Lundgren), para 700 ml de solución (Nutrientes)

(**) Fuente de energía utilizada para los cultivos, para 300 ml de solución Ferrosa (ión ferroso Fe²⁺)

Fuente: Álvarez Q., Armando. (2006)

3.6.5.4. Efecto del tamaño de partícula del mineral.

En suspensiones acuosas de partículas sólidas, los iones a ser oxidados son suministrados por la superficie de mineral. La concentración de estos iones está controlada por muchos fenómenos; es decir, por el producto de solubilidad, las reacciones de hidrólisis, la presencia de electrolitos inertes, la tensión superficial, el tamaño de partícula o área de superficie y el potencial de redox.

Uno de los mayores requerimientos para la oxidación de sulfuros por la bacteria es la disponibilidad del sustrato. La condición ideal existe, cuando el sustrato es soluble tal como el sulfato ferroso (sustrato). Para sustratos insolubles, se requiere una exposición adecuada de los minerales sulfurados. En el caso del sustrato insoluble, como el mineral sulfurado, el factor que realmente interesa e interviene directamente en la cinética del proceso no es su concentración

expresada como peso por unidad de volumen de suspensión. Al ser el compuesto insoluble, toda la materia que queda en el interior de la partícula no tiene intervención en el proceso y sólo aquella porción en contacto directo con el líquido tiene intervención, entonces la interfase sólido-líquido, se ve involucrada en la lixiviación. Por lo tanto, el factor concentración se ve reemplazado en este caso por el área de la interfase sólido-líquido, expresada convenientemente como área superficial por unidad de volumen.

Por lo tanto, un aumento en esta área, producido por un mayor grado de molienda, deberá tener un efecto favorable en la velocidad de solubilización. Los estudios realizados tanto minerales como con sistemas modelo confirman esta predicción.

Usando diferentes fracciones de tamaño en una muestra de pirita, los mejores resultados fueron obtenidos con la fracción de partículas de tamaño más pequeño. Usando concentrados de calcopirita, se determinó que el cobre se extrae más rápidamente de partículas finas que en partículas más grandes.

En la práctica, el tamaño óptimo de partícula tiene que ser determinado para cada clase de mineral a ser lixiviado. [2, Guido Nanetti Sandoval y Jose Robles Valenzuela. - 1997]

3.6.5.5. Efecto del oxígeno y CO_2

La disponibilidad del oxígeno es un factor que controla la extracción de metales por bacterias. No se conoce otro oxidante que pueda ser utilizado por los microorganismos en ambientes de lixiviación. El dióxido de carbono es utilizado como fuente para la fabricación de su arquitectura celular.

Estudiando el efecto del dióxido de carbono sobre la actividad bacteriana, se observó que la velocidad de oxidación de la pirita por el *T. Ferrooxidans* gradualmente disminuyó cuando se eliminó el CO_2 del aire usado para la aireación. Aumentando el contenido de CO_2 del aire se estimuló el crecimiento del *T. Ferrooxidans* usando hierro ferroso como sustrato. [20, Luis Ramírez Osco. - 2015]

3.6.5.6. Efecto de la densidad de pulpa

A bajas densidades de pulpa, la velocidad de extracción es directamente proporcional a la densidad de pulpa, pero a mayores densidades de pulpa la velocidad llega a ser independiente de esta variable. A todavía mayores valores de densidad de pulpa la velocidad de extracción disminuye.

A concentraciones bajas de mineral la velocidad de extracción está limitada por la cantidad de mineral disponible; es decir, la velocidad de crecimiento de la bacteria está limitada por la disponibilidad de fuente de energía

A densidad de pulpas mayores hay un exceso de fuente de energía y la velocidad de crecimiento bacteriana, y por lo tanto, la velocidad de extracción del mineral se ve limitada por otros factores [20, Luis Ramírez Osco. - 2015].

3.6.5.7. Tolerancia a la acumulación de iones

Estos microorganismos en general presentan una alta tolerancia a diversos iones metálicos. En la tabla 7 se entregan los valores máximos de concentración de diversos iones, superado los cuales se inhiben fuertemente o simplemente se detiene la actividad bacteriana.

También se ha reportado que existe una inhibición de la actividad bacterial con el aumento de iones férricos en la solución. El exceso de iones férrico suprime la oxidación del ión ferroso. Se determinó que el óptimo crecimiento se logra con una concentración de iones ferroso entre 1,5 y 3,0 g/L. [20, Luis Ramírez Osco. - 2015]

Tabla 7. Concentraciones máximas que inhiben la actividad bacteriana mesófila

<i>Catión</i>	<i>Conc. Máxima</i> (g/L)	<i>Catión Metálico</i>	<i>Conc. Máxima</i> (g/L)	<i>Aniones</i>	<i>Conc. Máxima</i>
Fe^{3+}	160	Co^{2+}	30	SO_4^{2-}	80-100 (g/L)
Zn^{2+}	119	As^{3+}	17	Cl^-	2-6 (g/L)
Ni^{2+}	72	UO_2^{2+}	0.5	NO_3^-	2-6 (g/L)
Cu^{2+}	55	Al^{3+}	10	CN^-	$2,5 \times 10^{-5} M$
Mn^{2+}	33	Mo^{2+}	2.9	F^-	$2,5 \times 10^{-5} M$
Cr^{2+}	0,8	Ag^+	<0,05	-	-
Hg^{2+}	0,1	Se^{2+}	-	-	-

El potencial de óxido-reducción (Eh) debe estar en un máximo de 800 – 850 mV

El pH no debe disminuir a menos de 1,0.

Fuente: Villas C., Roberto; Sánchez, Mario. (2006)

3.7. Lixiviación del oro con cianuro o cianuración

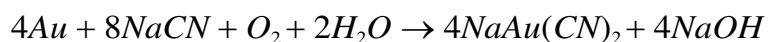
Las reacciones que tienen lugar durante la disolución de oro en las soluciones de cianuro, bajo condiciones normales, han sido estudiadas por varios científicos.

Figura 14. Cianuración del oro.



Fuente: Bustamante Rúa, Moisés; Tobón Suárez, Claudia. (2012

La mayoría de los científicos en la materia concuerdan que la ecuación global de la disolución es la siguiente:



Conocida como la ecuación de Eisner (1846), quien estableció la necesidad de la presencia de oxígeno para que el cianuro disuelva al oro.

En un sistema relativamente simple de este tipo, el oro se disuelve con facilidad y las únicas condiciones que requieren son: que el oro esté libre y limpio, que la solución de cianuro no contenga impurezas que puedan inhibir la reacción que se mantenga un adecuado abastecimiento de oxígeno a la solución durante todo el proceso de la reacción. [14, Dominic Mihovilovic, Esteban; Sánchez F., Mario; Correa C., Héctor. - 2006]

La recuperación de oro disuelto con cianuro normalmente se puede realizar a través de la precipitación con zinc, previas desaireación de las soluciones, proceso conocido como Merrill Crowe. La termodinámica de ambos procesos, el de la lixiviación con cianuro y el de la precipitación con zinc, se puede entender mejor observando el sector de operación de cada uno de ellos, como se muestra en el diagrama Eh-pH para el oro y el cianuro (figura 15)

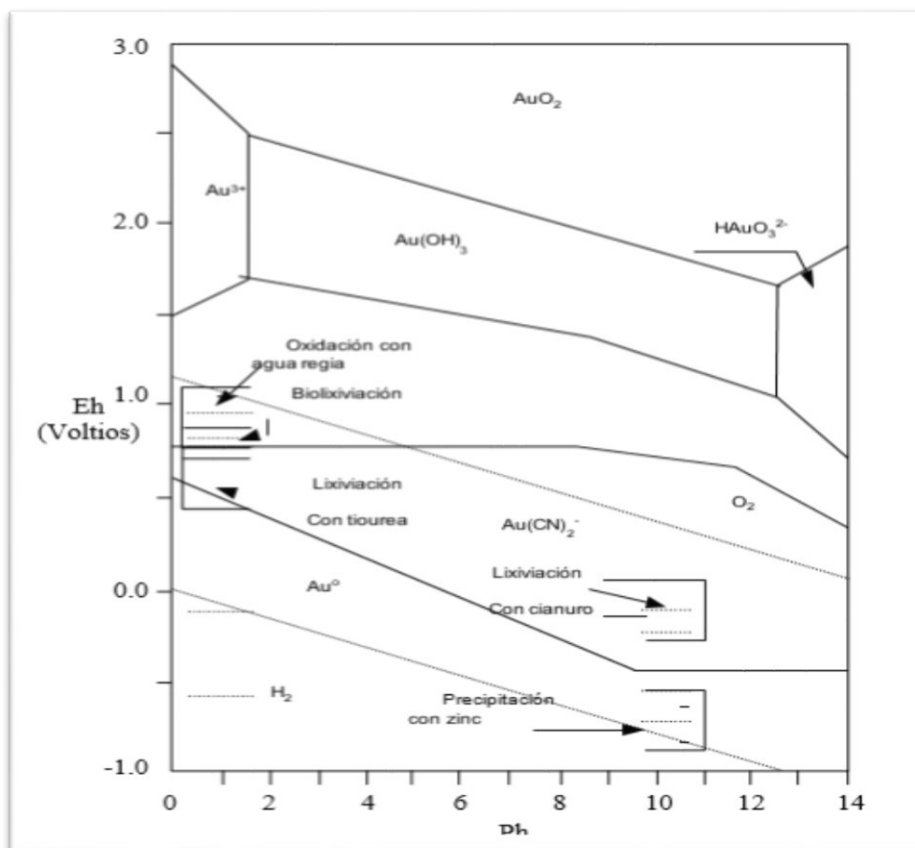
En el mismo diagrama de la figura 15 también se pueden apreciar los rangos de condiciones de estabilidad para otras ocurrencias de otras formas de disoluciones de oro: con agua regia, con tiourea y biolixiviación para sulfuros encapsulados. Según el diagrama Eh-pH (figura 15), se afirma que:

- Todo el proceso de cianuración en la práctica se realiza entre pH 10 y 11,5.
- Para la cianuración se requieren condiciones de operación oxidantes.

Para la precipitación con zinc las condiciones de operación conservando el pH alcalino, deben ser totalmente reductoras.

Así mismo en relación a la disolución con agua regia y con tiourea se requieren condiciones muy oxidantes y en ambiente ácido inferior a pH 1,5 y 2. Estas condiciones son también las que se utilizan para el tratamiento de oxidación de los minerales definidos como sulfuros refractarios que tienen el oro encapsulado. [15, Espí, J.A. - 2001]

Figura 15. Diagrama Eh-pH para el oro y el auro-cianuro, mostrando además los rangos de presión para los distintos otros procesos industriales de extracción de oro



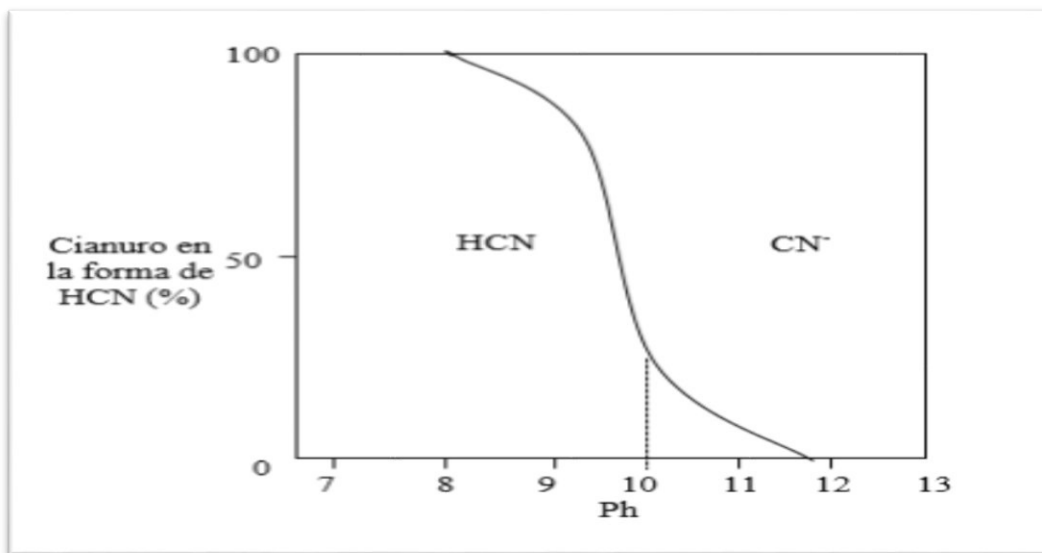
Fuente: Bustamante Rúa, Moisés; Tobón Suárez, Claudia. (2012)

Para la lixiviación, el cianuro se utiliza en alguna de sus formas más solubles, es decir, como cianuro de potasio (KCN), cianuro de sodio (NaCN) o cianuro de calcio $\text{Ca}(\text{CN})_2$. Sin embargo, industrialmente se prefiere usar NaCN por su mayor contenido de CN^- activo por unidad de peso (53% comparado con 40% en el caso del KCN). EL $\text{Ca}(\text{CN})_2$ no es utilizado, a pesar de presentar 56,5% de ion CN^- activo, debido a que se comercializa con mayor contenido de impurezas que en los otros casos. [16, Misari Ch., Fidel Sergio; Franco Jiménez, Juan Antonio. - 1993]

3.7.1. Química del cianuro en medio acuoso

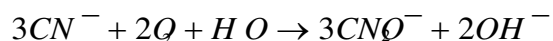
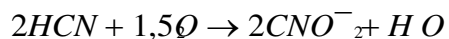
El cianuro de hidrogeno (HCN), es un ácido débil en soluciones acuosas. En la figura 16 se muestra el equilibrio de disociación del HCN en función de pH. A un pH cercano a 9,3, a la mitad del cianuro total se encuentra como HCN, mientras el resto se presenta como cianuro libre (CN^-). A pH 10,2 más del 90% del cianuro total se encuentra como CN^- y a pH 8.4 el 90% esta como HCN. Esto es importante ya que el HCN tiene una presión de vapor relativamente alta (100 kPa a 26°C), lo que hace que volatilice con facilidad en la superficie de las soluciones, en condiciones normales del ambiente, causando pérdidas importantes de cianuro en solución, con los consiguientes riesgos ambientales. Todo esto obliga a controlar cuidadosamente el pH operacional sobre pH 10.

Figura 16. Disociación entre el HCN y el CN^- libre (26°C), mostrando la conveniencia de operar sobre pH 10.



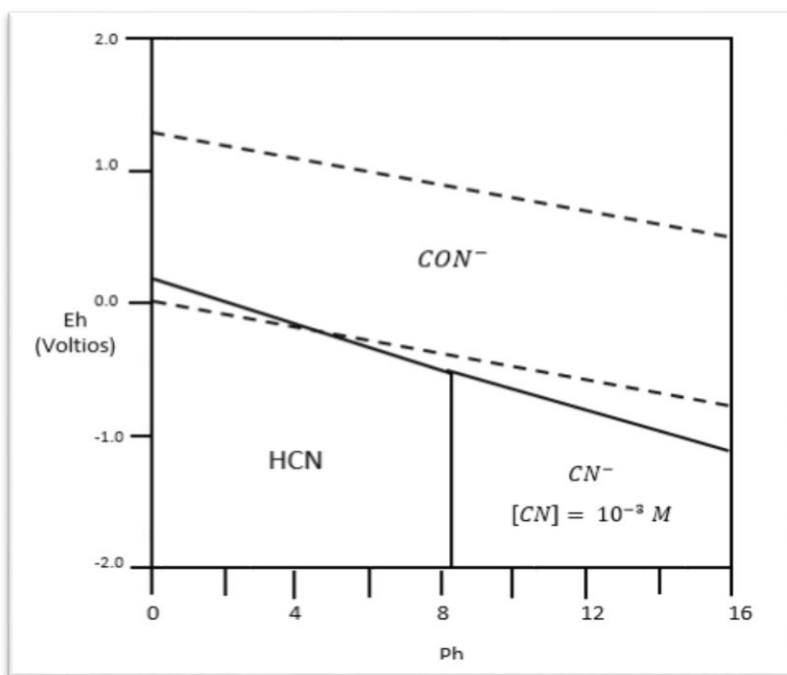
Fuente: Bustamante Rúa, Moisés; Tobón Suárez, Claudia. (2012)

El HCN y el cianuro libre (CN^-), en presencia de oxígeno y bajo condiciones oxidantes, se oxidan a cianato (CNO^-) de acuerdo a las siguientes reacciones:



Estas reacciones son indeseables durante el proceso de lixiviación, ya que reducen el cianuro libre disponible y las especies de cianato no disuelven oro. Según la figura 17 estas reacciones de oxidación debieran ser termodinámicamente espontáneas. Sin embargo en la práctica esto no ocurre y se requieren oxidantes muy fuertes, tales como: ozono (O_3), agua oxigenada (H_2O_2) o ácido hipocloroso (HClO) para lograr que la reacción para la destrucción del cianuro se produzca a una velocidad significativa. En condiciones simplemente aireadas, estas reacciones son extremadamente lentas. [19, Barsky, G; Swainson, S; Hedley, N. - 1934]

Figura 17. Diagrama Eh - pH para el sistema CN^- - H_2O a 25°C , considerando una concentración total de cianuro de 10^{-3} molar

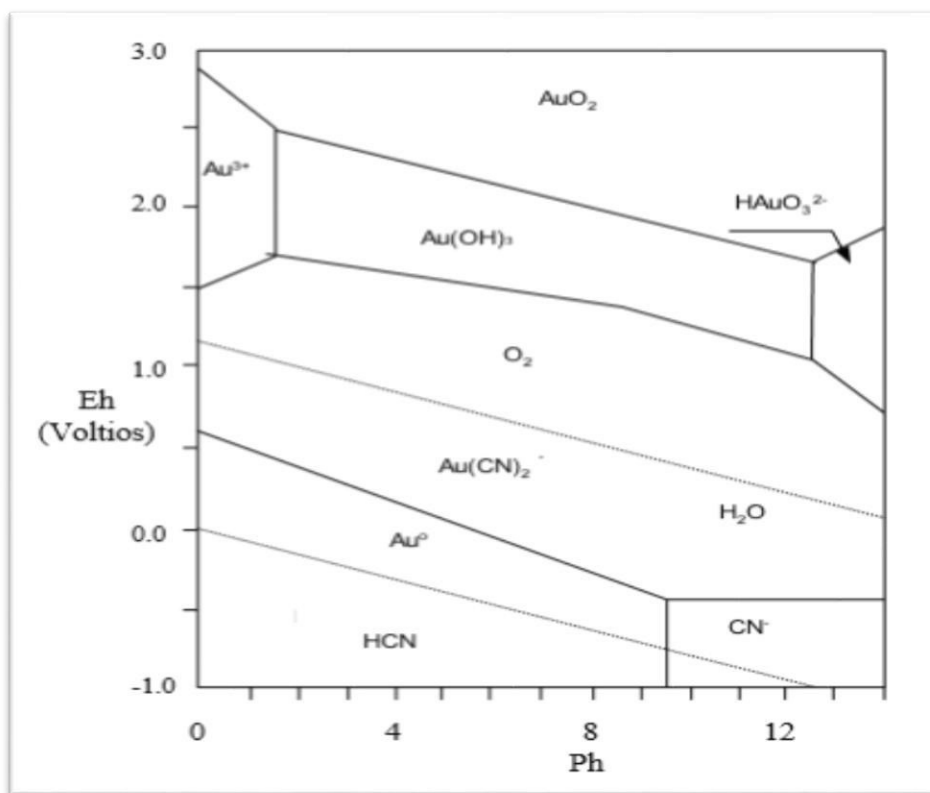


Fuente: Bustamante Rúa, Moisés; Tobón Suárez, Claudia. (2012)

3.7.2. Termodinámica de la cianuración

Para comprobar los mecanismos fisicoquímicos de la lixiviación del oro, es necesario recurrir a las propiedades termodinámicas y a los estables y metaestables representado en el diagrama de Pourbaix (figura 18), que relaciona el potencial de óxido-reducción (Eh) del metal con el pH del medio. Estos diagramas de compuestos como $\text{Au}(\text{OH})_2$, AuO_2 , $(\text{HAuO}_3)^{2-}$ y Au^{3+} requieren elevados potenciales redox (superiores al de la descomposición del oxígeno) para formarse. La lixiviación del oro metálico, es por lo tanto, muy difícil a causa de la gran estabilidad del oro. [19, Barsky, G; Swainson, S; Hedley, N. - 1934]

Figura 18. Diagrama Eh - pH para el sistema Au- H₂O-CN a 25°C, considerando una concentración total de cianuro de 10^{-3}



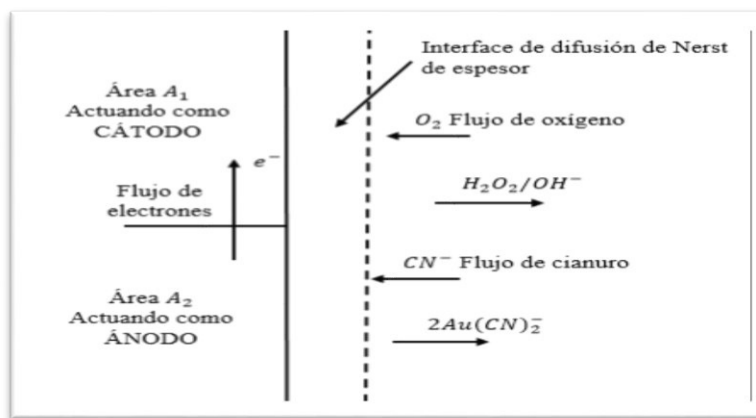
Fuente: Sepro Mineral Systems Corp. (2011)

En el diagrama Au-H₂O-CN (figura 18), no obstante la reacción $\text{Au}(\text{CN})_2^- + \text{e}^-$ se lleva a cabo dentro de los límites de estabilidad del agua. El campo de estabilidad del complejo aurocianuro está limitado por una recta que inicialmente, muestra una pendiente pronunciada (efecto de la hidrólisis del cianuro a pH menor a 9) tomándose luego casi horizontal debido a la acción oxidante del oxígeno en medio básico, hecho a su vez permite que se haga efectiva la reacción de lixiviación por formación de aurocianuro. En el mismo gráfico se pueden observar que los compuestos $\text{Au}(\text{OH})_3$, HAuO_3^{2-} y Au^{3+} son reducidos por la acción del cianuro. [19, Barsky, G; Swainson, S; Hedley, N. - 1934]

3.7.2.1. Mecanismo electroquímico.

En la cianuración, la disolución de oro está regida por los principios electroquímicos de corrosión, es decir, es un proceso de corrosión electroquímica. Así el área del oro se puede dividir en zona anódica y catódica, es decir sobre una parte de la superficie del oro (zona catódica), el oxígeno captaría electrones procedentes de la otra parte de la superficie. En la figura 19 se muestra la explicación esquemática de este fenómeno. [18, Hurtado H. 2003]

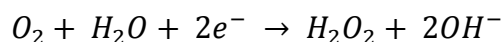
Figura 19. Diagrama esquemático del proceso de disolución del oro mostrado como una corrosión electroquímica.



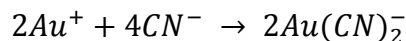
Fuente: Sepro Mineral Systems Corp. (2011)

Las Reacciones que ocurren son:

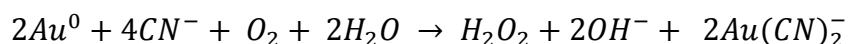
Cátodo:



Ánodo:



Reacción General:



3.7.2.2. Cinética de la reacción

La cianuración está gobernada por las leyes de Fick, y matemáticamente la velocidad de disolución está dada por la siguiente expresión

$$V = \frac{2AD_{O_2}D_{CN^-}[CN^-][O_2]}{\delta(D_{CN^-}[CN^-] + 4D_{O_2}[O_2])} \quad (4)$$

Donde:

D_{O_2} y D_{CN^-} : Son los coeficientes de difusión (cm^2/s)

$[O_2]$ y $[CN^-]$: Concentraciones de oxígeno y cianuro en la solución (mol/ml)

δ : Ancho de la capa límite de Nerst (cm)

A: Área donde ocurren las reacciones anódicas y catódicas De la ecuación (4) se puede considerar dos posibilidades:

Cuando las concentraciones de cianuro son bajas, el primer término del denominador es despreciable respecto al segundo, y la velocidad de disolución depende solo de la concentración de cianuro, la ecuación resultante será:

$$V = \frac{AD_{CN^-}[CN^-]}{2\delta}$$

Cuando las concentraciones de cianuro son altas, en este caso el segundo término del denominador de la ecuación (4) es despreciable respecto al primero, y la velocidad de disolución depende solo de la concentración del oxígeno, la ecuación resultante será:

$$V = \frac{AD_{O_2}[CN^-]}{\delta} \quad (6)$$

Cuando el proceso pasa de control por difusión de cianuro a control por difusión de oxígeno ambos reactantes deben estar emigrando a la superficie del metal a sus máximas velocidades. Así podemos igualar las ecuaciones (5) y (6) justo para este punto de cambio del control difusional, desde el cianuro al oxígeno, momento en el que se cumple:

$$D_{CN^-}[CN^-] = 4D_{O_2}[O_2], \quad \text{es decir}$$

$$\frac{D_{CN^-}[CN^-]}{D_{O_2}[O_2]} = 4 \quad (7)$$

Se ha demostrado experimentalmente $\frac{D_{O_2}}{D_{CN^-}} = 1.5$ (promedio establecido a partir de diferentes pruebas experimentales). Entonces reemplazando estos valores en la ecuación (7), resulta que la mayor velocidad para la disolución del oro ocurre cuando se cumple que las concentraciones del cianuro y del oxígeno disueltos se encuentran en una razón molar de aproximadamente seis. [16, Misari Ch., Fidel Sergio; Franco Jiménez, Juan Antonio. - 1993]

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 6$$

3.7.3. Interferencia de impurezas de los minerales

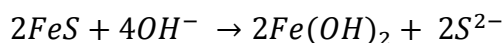
En la extracción de oro desde sistemas minerales, la velocidad de disolución es principalmente afectada por la complejidad del mineral. El oro que se encuentra en forma limpia, como partículas metálicas finas y liberadas, en general es fácilmente cianurable. La presencia de otras sustancias en los minerales, puede alterar este comportamiento, acelerando e inhibiendo la disolución del metal. [16, Misari Ch., Fidel Sergio; Franco Jiménez, Juan Antonio. - 1993]

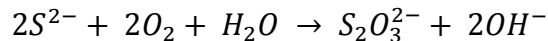
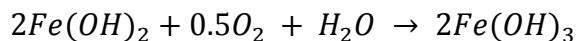
3.7.4. Aditivos aceleradores de la cianuración

Existen algunas sustancias que en pequeñas concentraciones, influyen favorablemente en la disolución de minerales de oro y plata por cianuración al depolarizar la superficie del metal. Estos iones son: el plomo, el mercurio, el bismuto y el talio. Cuando no están presentes en forma soluble naturalmente en los minerales, se suelen agregar externamente: En estos casos se usa una sal soluble, como por ejemplo, el acetato o nitrato de plomo, que se dosifica en mínimas cantidades. Se cree que en este caso cambian algunas características físicas de la superficie del oro, pasando a comportarse como una pseudo-aleación Au- Pb, con lo que disminuirá el espesor de la capa límite. [19, Barsky, G; Swainson, S; Hedley, N. - 1934]

Inhibidores por consumo de oxígeno

Por otro lado, existen un gran número de sustancias que remueven el oxígeno disuelto desde las soluciones cianuradas retardando y algunas veces deteniendo completamente la acción del cianuro. Por ejemplo la pirrotita actúa consumiendo oxígeno, doblemente vía la oxidación del hierro y vía la oxidación del ión sulfuro (S^{2-}) formando tiosulfatos, ambos sin utilidad en la lixiviación. [16, Misari Ch., Fidel Sergio; Franco Jiménez, Juan Antonio. - 1993]

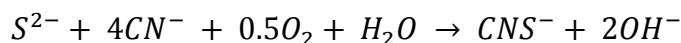
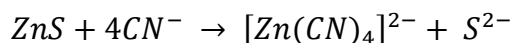




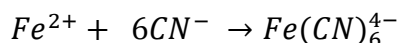
Inhibidores por consumo de cianuro

Otras sustancias consumen cianuro y además forman compuestos que dificultan la disolución de oro, sin beneficios para el proceso y de esta forma inhiben la disolución de oro. Ejemplos de estos son:

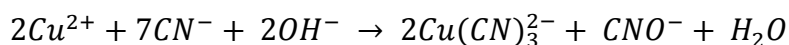
- Los minerales sulfurados de cobre, zinc, arsénico y antimonio. El ión metálico reacciona formando un cianuro del metal. Además el ión sulfuro también consume cianuro formando tiocianatos que no tienen acción lixivante alguna:



- El hierro disuelto, es la forma de iones o complejos, los cuales se comportan como inhibidores desde débiles hasta muy fuertes ya que con el cianuro forman otros complejos y sales, comportándose como consumidor de cianuro en soluciones alcalinas. Esto ocurre, por ejemplo, con el ion ferroso:



- Los iones cúpricos que en soluciones cianuradas alcalinas pueden comportarse de acuerdo a la siguiente reacción:



Donde el complejo de cianuro de cobre representa un importante mayor consumo de cianuro. [16, Misari Ch., Fidel Sergio; Franco Jiménez, Juan Antonio. - 1993]

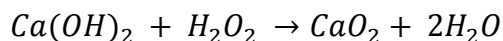
Inhibidores por reacción con la cal

Los minerales de arsénico y antimonio disminuyen la disolución de oro a medida que aumenta la alcalinidad ya que consumen cal hidratada, Ca(OH)_2 , oxígeno y cianuro, formando compuestos indeseados como arseniatos y antimoniatos de calcio.

Pasivación superficial de la interfase de reacción

Existen elementos que pasivan al oro o que podrían formar compuestos insolubles sobre la superficie del oro, estos compuestos son:

- El ion Sulfuro (S^{2+}), cuyo efecto depresivo, retardando la disolución de oro. Algunas veces la disolución puede ser detenida completamente, debido a la formación de una película aurosulfurada insoluble sobre la superficie de las partículas de oro.
- El peróxido de calcio (CaO_2) produce un efecto de pasivación superficial semejante. Este peróxido se produce como una reacción secundaria al usar hidróxido de calcio (cal hidratada o apagada), para controlar el pH, según la siguiente reacción [16, Misari Ch., Fidel Sergio; Franco Jiménez, Juan Antonio. - 1993]



3.8. Tratamientos de efluentes mineros

El incremento de la actividad minera, combinado con una mayor preocupación por sus efectos ambientales, ha generado un renovado interés por el desarrollo de nuevos procesos para el tratamiento de disoluciones metalúrgicas y otras aguas de mina. Actualmente existe una gran

variedad de procesos de tratamientos químicos, físicos y biológicos para la eliminación o recuperación de metales, cianuros y otros subproductos de los procesos y tratamientos metalúrgicos.

El desarrollo de un proceso viable para el tratamiento de un efluente metalúrgico exige el conocimiento pleno de los procesos metalúrgicos, de la geoquímica de los minerales, de la hidrología del lugar y de las posibles fuentes de agua residual y sus características. Cada uno de las facetas de la explotación minera influye sobre la cantidad y calidad de efluentes producida y sobre la selección de las alternativas de tratamiento. [21, Diaz Inocente Daysi Kelly y Condori Ccoillo Ismael Rene - 2015]

El Ministerio de Energía y Minas en coordinación con el Ministerio del Ambiente, en la que se indican los procedimientos que se deben seguir para el monitoreo del cuerpo receptor y de efluentes líquidos de actividades minero - metalúrgicas. Sólo será considerado válido el monitoreo realizado de conformidad con el Protocolo, su cumplimiento es materia de fiscalización.

Mediante Resolución Ministerial N° 011-96-EMVMM, se aprobaron los niveles máximos permisibles para efluentes líquidos minero-metalúrgicos. [22, Ministerio de Ambiente del Perú - DECRETO SUPREMO N° 010-2010-MINAM010. - 2010]

Límite Máximo Permisible (LMP).- Medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan al efluente líquido de actividades minero-metalúrgicas, y que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al

bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el sistema de gestión ambiental.

Tomamos en consideración la degradación del cianuro ya que en nuestra tesis de investigación utilizamos dicho reactivo por lo cual realizamos el proceso de detoxificación. Para cumplir con los LMP. [22, Ministerio de Ambiente del Perú - DECRETO SUPREMO N° 010-2010-MINAM010. - 2010]

3.8.1. Procesos de detoxificación de soluciones cianuradas

El principal objetivo en una campaña de degradación de cianuro en efluentes metalúrgicos es disminuir la concentración de cianuro libre a niveles asimilables para los seres vivos. Para ello se han empleado varios métodos que en general se pueden clasificar en:

- **Degradación natural**

La degradación natural en las pozas de tratamiento se lleva a cabo debido a la interacción de varios procesos como la volatilización, hidrólisis, foto degradación, disociación, oxidación química y bacteriológica, y precipitación. La degradación natural puede verse influenciada por variables como: las especies de cianuro en la solución y sus respectivas concentraciones, temperatura, pH, aeración, rayos de sol, presencia de bacterias, tamaño de poza, profundidad y turbulencia. Los mecanismos principales que controlan la degradación natural del cianuro son la volatilización del

HCN y la disociación de los complejos metálicos cianurados, siendo esta última, la etapa controlante del proceso.

La degradación natural es un método simple de disminución de concentraciones de cianuro, pero su éxito depende de las especies de cianuro presente, el tiempo de retención que la poza de almacenamiento puede proveer y los niveles de cianuro residual esperados. Las mayores ventajas del proceso de degradación natural son los bajos costos de capital y operación, no se conoce de formación de productos tóxicos, y se le puede usar como un pre-tratamiento. Este proceso no es adecuado si el tiempo de retención en la poza es limitado o si existe peligro de toxicidad para la vida silvestre. [21, Diaz Inocente Daysi Kelly y Condori Ccoillo Ismael Rene - 2015]

- **Degradación por recuperación del cianuro**

En muchos casos en que se tiene efluentes con contenidos de cianuro, es ventajoso regenerar cianuro, ya que, el costo de cianuro nuevo es de 3 a 5 veces el costo de cianuro reciclado, se reducen los costos de tratamiento de soluciones cianuradas y es posible recuperar los metales contenidos en las soluciones cianuradas.

El cianuro que puede recuperarse de los diferentes procesos para regenerar cianuro son el cianuro libre, complejos cianurados de Cu, Zn, Ni, Cd y Co(II). Los que no son recuperables son: tiocianatos, cianatos y los complejos de Hierro. [21, Diaz Inocente Daysi Kelly y Condori Ccoillo Ismael Rene - 2015]

- **Degradación por precipitación**

La precipitación de cianuros estables se puede obtener mediante la adición deliberada de acomplejantes tales como el hierro. Esto reduce la concentración de cianuro libre y también es eficaz para controlar los elevados niveles de otros metales que están presentes como resultado del tratamiento. [21, Diaz Inocente Daysi Kelly y Condori Ccoillo Ismael Rene - 2015]

- **Degradación por conversión a formas menos tóxicas**

Conversión a Tiocianato

La conversión de cianuro a tiocianato fue revisado por Dodge y Reams (1 949), el cianuro se convierte en tiocianato por una mezcla de peroxido y tiosulfato a pH entre 7 y 10. El cianuro reacciona con polisulfuros en solución a 80°C para formar tiocianato. El sulfuro de cal (70% de sulfuro de calcio, 5% de tiosulfato de calcio, 5% de azufre libre), se usa como fuente de polisulfuro usado como fungicida en agricultura. [21, Diaz Inocente Daysi Kelly y Condori Ccoillo Ismael Rene - 2015]

Conversión a Ferrocianuro

La adición de excesos de sulfato ferroso a las soluciones cianuradas ajustadas entre pH 7,5 y 10,5 convierte la mayor parte del cianuro en ferrocianuro. Este es uno de los métodos más antiguos de disposición de cianuro. El método trabaja mejor para soluciones de 10 a 100 ppm de HCN, y requiere grandes excesos de sulfato ferroso (16 moles por mol de cianuro para soluciones cuprocianuradas). Se puede alcanzar reducciones en las concentraciones de cianuro de 88 a 96%. Las sales de ferrocianuro

formado son muy estables y precipitan rápidamente, pero a pesar de ser considerados no tóxicos, estos se fotodegradan liberando HCN. 43 [21, Diaz Inocente Daysi Kelly y Condori Ccoillo Ismael Rene - 2015]

- **Degradación por oxidación**

Los procesos de oxidación química para el tratamiento del cianuro incluyen el proceso con SO_2 /Aire (desarrollado por dos compañías canadienses, INCO y NORANDA) y el proceso de tratamiento con Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2 , iniciado por Degussa). Una alternativa de oxidación química más antigua, es el Proceso de Cloración Alcalina, se utiliza rara vez en la industria minera en la actualidad. [21, Diaz Inocente Daysi Kelly y Condori Ccoillo Ismael Rene - 2015]

CAPITULO IV

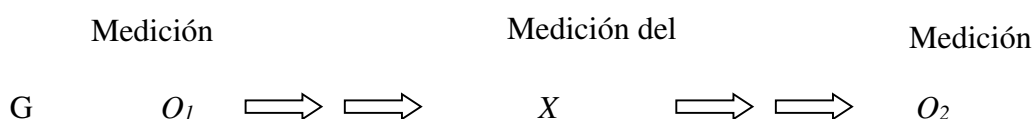
METODOLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

4.1. Tipo y diseño de investigación

En la presente tesis la investigación realizada es experimental, dado que utiliza experimentos y principios encontrados en el método científico, es decir aplican los conocimientos existentes de la caracterización del mineral, procesos de flotación, biolixiviación y cianuración, y estos son aplicados para solucionar los problemas en la recuperación de oro en relaves de concentrados refractarios de cianuración.

La investigación es cuantitativa y deductiva, dado que manipula, analiza e interpreta resultados de las variables dependientes e independientes en cada prueba, tomando como base las teorías de la problemática en la presente investigación.

El diseño de investigación propuesto es la siguiente:



O_1 : Procesos convencionales que proporcionan recuperaciones muy bajas de oro y plata en relaves de cianuración de concentrados refractarios.

X : Aplicación del proceso en estudio de la presente investigación, para mejorar la recuperación de oro y plata en relaves de cianuración de concentrados refractarios.

O_2 : Recuperación de oro y plata de los relaves de cianuración de concentrados refractarios.

4.2. Unidad de análisis

La presente investigación se efectuó en la localidad de Calpa, departamento de Arequipa, ya que es en donde se desarrolla y recopila toda la información utilizada para la presente investigación, teniendo en cuenta también a las comunidades aledañas.

4.3. Población de estudio

La población de estudio de la presente investigación correspondió al muestreo realizado por calicatas de la relavera de cianuración de concentrados refractaria en la localidad de Calpa, departamento de Arequipa.

Los estudios de la investigación y pruebas metalúrgicas se realizaron en los laboratorios de metalurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM, y la caracterización del mineral, se realizó en la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la UNMSM.

4.4. Tamaño de muestra

La cantidad estimada de muestra para los estudios correspondientes fue de 50 Kg, y con ella se realizaron las pruebas de flotación, biolixiviación y cianuración correspondientes al desarrollo de la investigación, además de esto se deja una muestra testigo para la corroboración de las pruebas correspondientes.

4.5. Selección de muestra

Una vez obtenido la muestra representativa de 50 Kg. fue trasladada a la sala de muestras donde fue homogenizado y cuarteada, hasta obtener aproximadamente 25 Kg. Después fue

disgregado. Dicha muestra fue el alimento a la molienda para realizar las diferentes pruebas metalúrgicas que se realizaron en la presente investigación.

4.6. Procedimiento metodológico de la investigación

La metodología consistirá en lo siguiente:

- Información bibliográfica sobre la problemática de la investigación.
- Obtener una muestra representativa del material en estudio (relave de cianuración de concentrados refractarios).
- La muestra representativa remolida de cabeza de 300 gramos con una granulometría de 100% - 10m, se envió al laboratorio de análisis químico para el reporte de leyes en oro y plata.
- De la muestra remolida de cabeza de 300 gramos, también se envió al laboratorio de Microscopía óptica, para la caracterización y tener como resultado los componentes de la muestra, diferentes tipos de entrelazamientos, tamaño de las partículas y grados de liberación de las especies mineralógicas.
- Pruebas preliminares de flotación a nivel de laboratorio.
- Pruebas preliminares de biolixiviación del concentrado de flotación a nivel de laboratorio.
- Pruebas preliminares de cianuración de los concentrados de flotación biolixiviados a nivel de laboratorio.
- Pruebas definitivas de flotación.
- Pruebas definitivas de biolixiviación del concentrado de flotación.
- Pruebas definitivas de cianuración de los concentrados de flotación biolixiviados.
- Realizar los correspondientes balances metalúrgicos a cada prueba correspondiente.

- Proponer en base a los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, pruebas a nivel de planta piloto.

4.7. Análisis mineralógico de la investigación

En la muestra correspondiente al mineral de oro se observó mediante el método de Microscopia Polarizante de Luz Reflejada, para realizarle una caracterización y a partir de ello se llevó a cabo el análisis modal. En la siguiente tabla se insertan los minerales observados y los que han intervenido en el análisis modal.

Tabla 8. Minerales observados en la muestra

MINERALES	FORMULA	ABREVIATURA
Calcopirita	CuFeS ₂	Cp
Covelita	CuS	Cv
Calcocita	Cu ₂ S	Cc
Esfalerita	ZnS	Ef
Pirita	FeS ₂	Py
Pirrotita	Fe ₁ -XS	Po
Marcasita	FeS ₂	Mc
Hematita	Fe ₂ O ₃	Hm
Psilomelano	(Ba,H ₂ O)2Mn5O10	PsI
Pirolusita	MnO ₂	Prl
Goethita	FeO.OH	Gt
Gangas		GGs

* Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

4.8. Caracterización mineralógica

En esta muestra se han determinado los minerales siguientes:

4.8.1. Distribución volumétrica porcentual

Los minerales que a continuación se dan son aquellos que **han intervenido en el análisis modal** y su distribución es en forma porcentual:

Tabla 9. Distribución volumétrica porcentual.

MINERALES	VOLUMEN PORCENTUAL
Calcopirita	0.42
Covelita	0.01
Esfalerita	0.04
Pirita	76.96
Pirrotita	0.00
Marcasita	0.08
Hematita	0.01
Psilomelano	0.03
Pirolusita	0.03
Goethita	3.43
Gangas	18.99
TOTAL	100.00

Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

4.8.2. Grados de liberación

Los minerales que han intervenido en el análisis modal, presentan los grados de liberación expresados porcentualmente, y son como se dan en el cuadro siguiente:

Tabla 10. Grados de liberación porcentual

MINERALES	GRADO DE LIBERACIÓN PORCENTUAL
Calcopirita	92.59
Covelita	0.00
Esfalerita	0.04
Pirita	99.86
Pirrotita	0.00
Marcasita	100.00
Hematita	0.00
Psilomelano	0.00
Pirolusita	0.00
Goethita	72.52
Gangas	92.37

Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

4.8.3. Interpretación de los grados de liberación de los minerales que han intervenido en el análisis modal.

De los dos tablas anteriores 9 y 10, se deduce la siguiente interpretación, para los minerales que han intervenido en el análisis modal, y es como sigue:

La calcopirita ocupa el 0.42% del volumen total de la muestra, de este volumen el 92.59% se halla libre, mientras que el 7.41% restante, se encuentra aún entrelazada, el motivo de su no liberación total, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos, tal como se pueden apreciar en la tabla No. 9 y 10 correspondiente a esta muestra.

La covelita ocupa el 0.01% del volumen total de la muestra, de este volumen el 0.00% se halla libre, mientras que el 100.00% restante, se encuentra aún entrelazada, el motivo de su no liberación total, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos, tal como se pueden apreciar en la tabla No. 9 y 10 correspondiente a esta muestra.

La esfalerita ocupa el 0.04% del volumen total de la muestra, de este volumen, el 0.00% se halla libre, permaneciendo aún entrelazada el 100.00% restante, el motivo por lo que no halla totalmente libre, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos, tal como se pueden observar en la tabla No. 9 y 10 correspondiente a esta muestra.

La pirita ocupa el 76.96% del volumen total de la muestra, de este volumen el 99.86% se halla libre, habiendo quedado el 0.14% restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los que está inmerso, como se puede observar en la tabla N° 9 y 10 correspondiente a esta muestra.

La pirrotita se halla en el orden de trazas, habiéndose observado a los contabilizados en 100,00% entrelazados, por lo que no hay presencia de granos libres.

La marcasita ocupa el 0.08% del volumen total de la muestra, de este volumen el 100.00% se halla libre, lo que indica que, de las partículas de este mineral que han intervenido en el análisis modal, todas se hallan libres.

La hematita ocupa el 0.01% del volumen total de la muestra, de este volumen el 0.00% se halla libre, habiendo quedado el 100.00% restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los que está inmerso, como se puede observar en la tabla N° 9 y 10 correspondiente a esta muestra.

El psilomelano ocupa el 0.03% del volumen total de la muestra, de este volumen el 0.00% se halla libre, habiendo quedado el 100.00% restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los que está inmerso, como se puede observar en la tabla N° 9 y 10 correspondiente a esta muestra.

La pirolusita ocupa el 0.03% del volumen total de la muestra, de este volumen el 0.00% se halla libre, habiendo quedado el 100.00% restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los que está inmerso, como se puede observar en la tabla N° 9 y 10 correspondiente a esta muestra.

La goethita ocupa el 3.43% del volumen total de la muestra, de este volumen el 72.52% se halla libre, habiendo quedado el 27.48% restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los que está inmerso, como se puede observar en la tabla N° 9 y 10 correspondiente a esta muestra.

Las gangas ocupan el 18.99% del volumen total de la muestra, de este volumen el 92.37% se halla libre, habiendo quedado el 7.63% restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los que está inmerso, como se puede observar en la tabla N° 9 y 10 correspondiente a esta muestra.

Tabla 11. Volúmenes y grados de liberación de los Minerales observados

Muestra: RELAVE CIANURACION																																							
MINERALES			CALCOPIRITA		COVELITA		ESFALERITA		PIRITA		PIRROTITA		MARCASITA		HEMATITA		PSILOMELANO		PIROLUSITA		GOETHITA		GANGAS																
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V															
Total de Partículas Libres % Volumen Partículas libres	3718		15		0		0		2935		0		3		0		0		0		95		670																
	97,36			0,39		0,00		0,00		76,85		0,00		0,08		0,00		0,00		0,00		2,49		17,54															
TOT.PARTICULAS	NUMERO	VOLUMEN	CALCOPIRITA		COVELITA		ESFALERITA		PIRITA		PIRROTITA		MARCASITA		HEMATITA		PSILOMELANO		PIROLUSITA		GOETHITA		GANGAS																
ENTRELAZADAS	PARTICUL.	PORCENTUAL	N	% V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V															
cp-py	1	0,03	0,60	0,02	0,20	0,01	1,50	0,04	0,40	0,01	0,10	0,00									0,40	0,01																	
cp-gt	1	0,03	0,60	0,02																	0,80	0,02																	
cv-py	1	0,03																																					
ef-GGs	5	0,13																																				3,50	0,09
py-po	1	0,03																							0,90	0,02													
py-gt	20	0,52							0,45	0,01											19,55	0,51																	
py-GGs	20	0,52							1,60	0,04													18,40	0,48															
hm-gt	5	0,13													0,50	0,01					4,50	0,12																	
psl-pyl	2	0,05															1,00	0,03	1,00	0,03																			
gt-GGs	45	1,18																			11,55	0,30	33,45	0,88															
TOTAL ENTREL.	101	2,64	1,20	0,03	0,20	0,01	1,50	0,04	4,15	0,11	0,10	0,00	-	-	0,50	0,01	1,00	0,03	1,00	0,03	36,00	0,94	55,35	1,45															
TOT.LIB+ENLZ	3819	100,00	16,20		0,20		1,50		2939,15		0,10		3,00		0,50		1,00		1,00		131,00		725,35																
TOT.VOL.PORCENTUAL		100,00		0,42		0,01		0,04		76,96		0,00		0,08		0,01		0,03		0,03		3,43		18,99															
GRADOS DE LIB.PORCENTUAL			92,59		0,00		0,00		99,86		0,00		100,00		0,00		0,00		0,00		72,52		92,37																
N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.																																							
Simbolos : %V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.																																							

Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

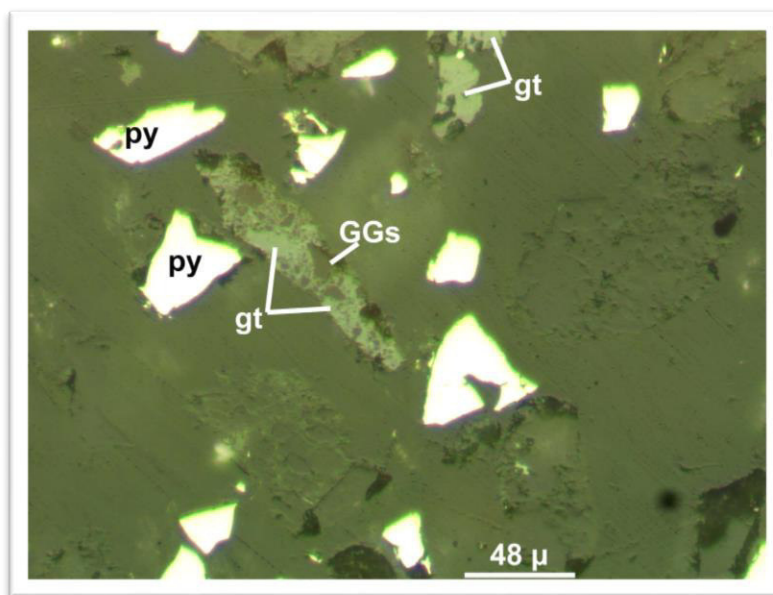
Tabla 12. Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa

MINERALES	TIPO	NUM.	DIST.	POSIBILIDADES DE
ENTRELAZADOS	ENTR.	PART.	PORC.	LIBERACION COMPLETA
Partículas Libres		3718	97,36	
cp-py	1eI	1	0,03	Muy difícil a imposible
cp-gt	2aI	1	0,03	Muy difícil a imposible
cv-py	2aI	1	0,03	Muy difícil a imposible
ef-GGs	1bIV	5	0,13	Moderadamente fácil
py-po	1eI	1	0,03	Muy difícil a imposible
py-gt	1eI	15	0,39	Muy difícil a imposible
	1eII	5	0,13	Muy difícil a imposible
py-GGs	1eI	5	0,13	Muy difícil a imposible
	1eII	15	0,39	Muy difícil a imposible
hm.gt	1bIV	5	0,13	Moderadamente fácil
psl-prl	2bIII	1	0,03	Muy difícil
	2cII	1	0,03	Muy difícil a imposible
gt-GGs	1aIII	5	0,13	Fácil
	1dII	5	0,13	Imposible
	1eI	5	0,13	Muy difícil a imposible
	1eII	5	0,13	Muy difícil a imposible
	2bIII	5	0,13	Muy difícil
	3dII	5	0,13	Muy difícil a imposible
	3dIII	15	0,39	Muy difícil a imposible
TOTAL		3819	100,00	

Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

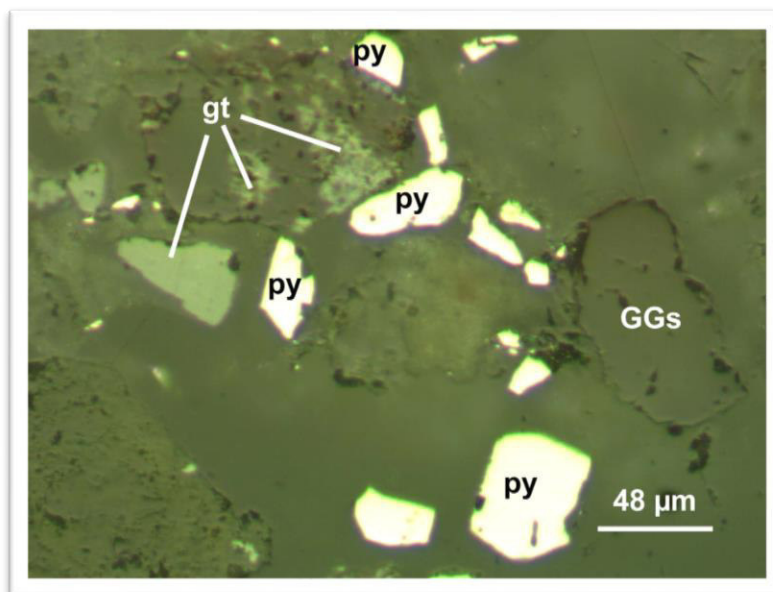
FIGURAS

Figura 20. Partículas libres de pirita (py), de gangas (GGs) y de goethita (gt); partícula entrelazada de goethita (gt) con la ganga (GGs). 200X.



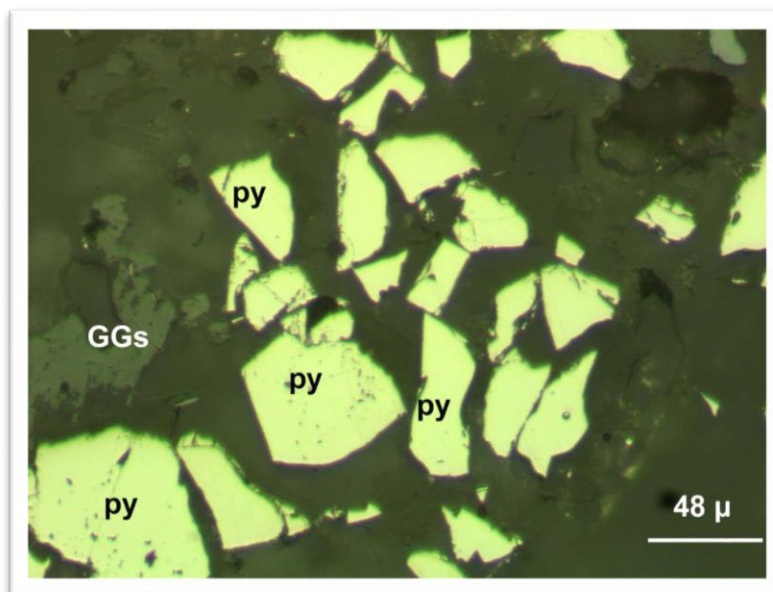
Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

Figura 21. Partículas libres de pirita (py), de goethita (gt) y de gangas (GGs). 200X.



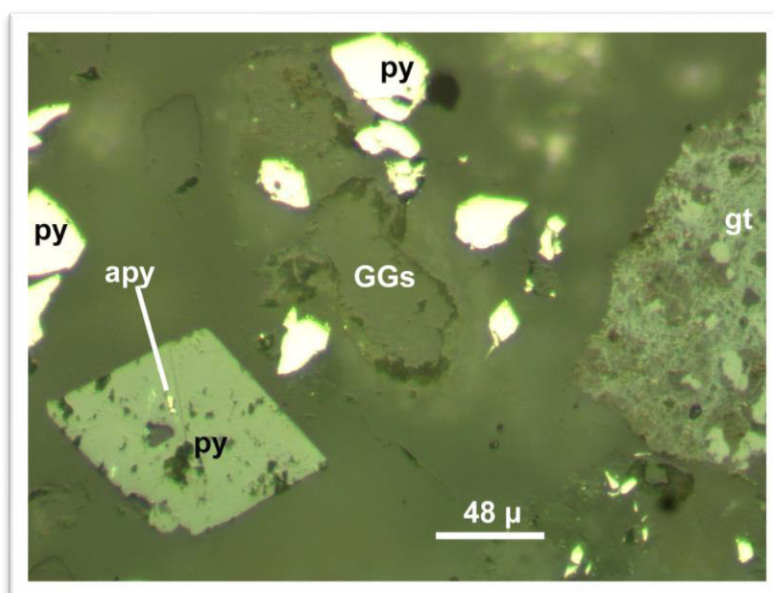
Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

Figura 22. Partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs). 200X.



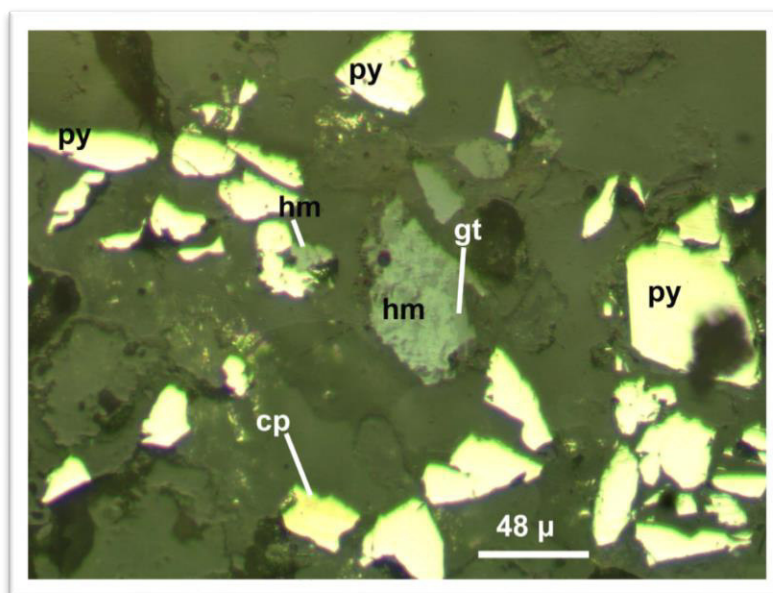
Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

Figura 23. Partículas libres de pirita (py), de gangas (GGs) y partículas entrelazadas de arsenopirita (apy) con la goethita (gt) y de goethita (gt) con la ganga (GGs). 200X.



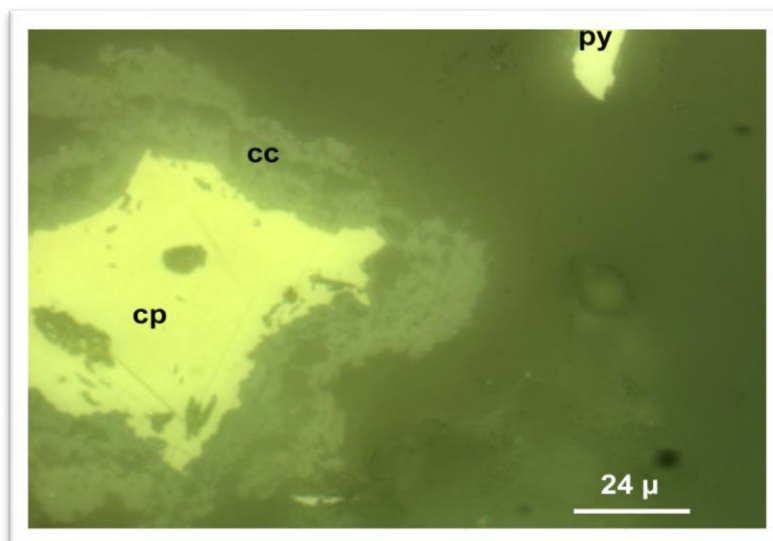
Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

Figura 24. Partículas libres de pirita (py), de calcopirita (cp) y partícula entrelazada de hematita (hm) con la goethita (gt). 200X.



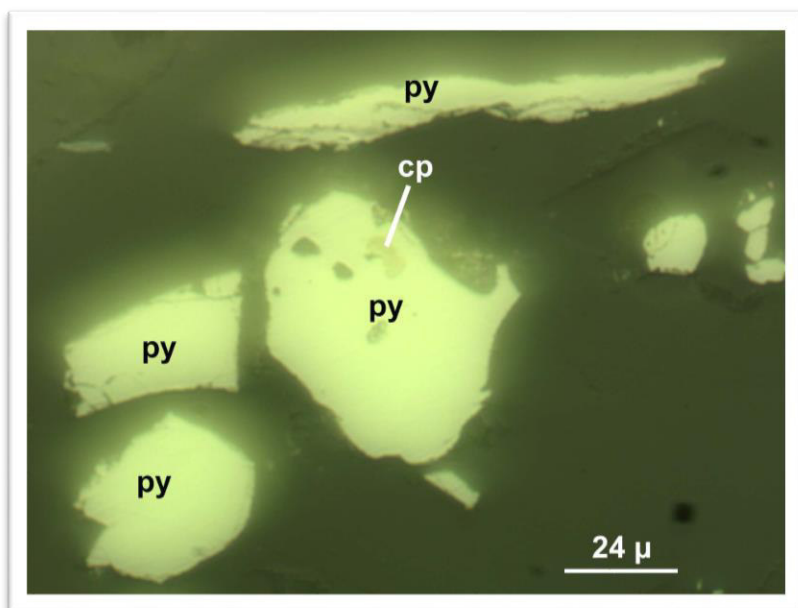
Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

Figura 25. Partícula libre de pirita (py) y partícula entrelazada de calcopirita (cp) con la calcocita (cc). 500X.



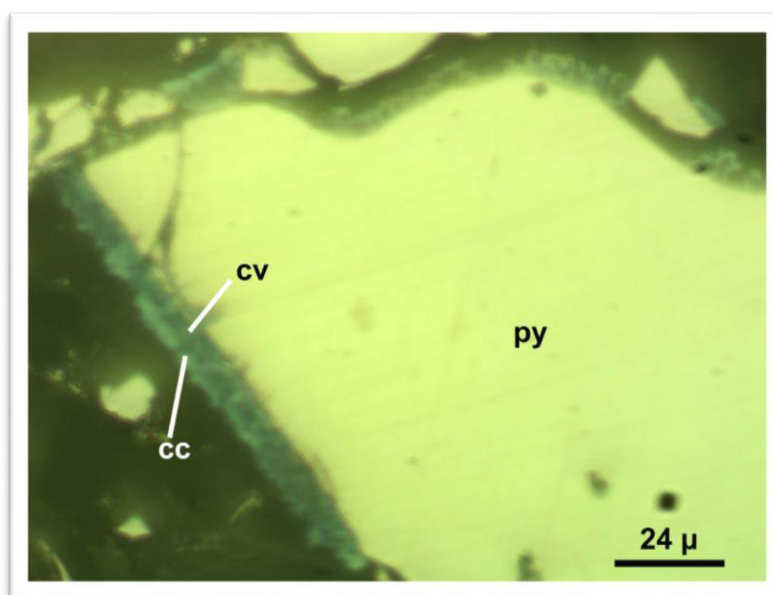
Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018).

Figura 26. Partículas libres de pirita (py) y partícula entrelazada de calcopirita (cp) con la pirrotita (po). 500X.



Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

Figura 27. Partícula entrelazada de la calcocita (cc) con la covelita (cv) y con la pirita (py). 500X



Fuente: Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

CAPITULO V

PRUEBAS EXPERIMENTALES

5.1. Pruebas de flotación de los relaves de cianuración

Se realizó la flotación de los relaves de cianuración. Esta etapa consiste básicamente en una prueba Rougher, seguida por una flotación cleaner o de limpieza. La finalidad que tiene esta etapa es recuperar el oro de los relaves de cianuración y así mejorar la recuperación de oro y plata, para ello se consideró como variable independiente la dosificación de isopropílico de sodio (Z-11) y como variable dependiente el porcentaje de recuperación del oro.

En la tabla N° 13 se presentan las condiciones de operación, y en las tablas N° 14, 15, 16 y 17 se presentan los balances metalúrgicos para las distintas pruebas que se realizaron.

5.1.1. Condiciones de la prueba

Tabla 13. Condiciones de la prueba en flotación

Peso de la muestra	1100 gr
Granulometría	82.5 % - 200m.
pH	6.8
Tiempo de acondicionamiento	5 minutos
Tiempo de flotación	7 minutos
Z-11	50, 60, 70, 80 gr/TM
MIBC	45,7 gr/TM

* Fuente: elaboración propia

5.1.2. Resultados de la flotación para un consumo de 50 g/TM de XANTATO Z11

Tabla 14. Balance metalúrgico de flotación para un consumo de 50.00 g/TM de Z-11

COMPONENTES	PESO (g)	%PESO	LEY(gr/TM)		CONTENIDO METÁLICO		% RECUPERACIÓN		RATIO
			Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	
CABEZA	1100	100							
CONCENTRADO	221.9	20.17	11.93	9.3	240.66	187.61	44.84	43.40	4.96
MEDIO	77.6	7.05	11.52	9.1	81.27	64.20	15.15	14.85	
RELAVE	800.5	72.77	2.95	2.48	214.68	180.48	40.01	41.75	

* Fuente: elaboración propia

%Recup. Au: 59.99 %Recup. Ag: 58.25

5.1.3. Resultados de la flotación para un consumo de 60 g/TM de XANTATO Z-11

Tabla 15. Balance metalúrgico de flotación para un consumo de 60.00 g/TM de Z-11

COMPONENTES	PESO	%PESO	LEY(gr/TM)		METÁLICO		RECUPERACIÓN		RATIO
			Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	
CABEZA	1100	100							
CONCENTRADO	234.3	21.30	18.37	21.32	391.28	454.12	69.87	75.80	4.69
MEDIO	81.4	7.40	11.72	10.15	86.73	75.11	15.49	12.54	
RELAVE	784.3	71.30	1.15	0.98	82.00	69.87	14.64	11.66	

* Fuente: elaboración propia

%Recup. Au: 85.36 %Recup. Ag: 88.34

5.1.4. Resultados de la flotación para un consumo de 70 g/TM de XANTATO Z-11

Tabla 16. Balance metalúrgico de flotación para un consumo de 70.00 g/TM de Z-11

COMPONENTES	PESO	%PESO	LEY(gr/TM)		METÁLICO		RECUPERACIÓN		RATIO
			Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	
CABEZA	1100	100							
CONCENTRADO	245.3	22.30	19.72	24.12	439.76	537.88	78.20	81.67	4.48
MEDIO	93.8	8.53	11.94	9.45	101.82	80.58	18.11	12.24	
RELAVE	760.9	69.17	0.3	0.58	20.75	40.12	3.69	6.09	

* Fuente: elaboración propia

% Recup. Au: 96.31

% Recup. Ag: 93.91

5.1.5. Resultados de la flotación para un consumo de 80 g/TM de XANTATO Z-11

Tabla 17. Balance metalúrgico de flotación para un consumo de 80.00 g/TM de Z-11

COMPONENTES	PESO (g)	%PESO	LEY(gr/TM)		METALICO		% RECUPERACION		RATIO
			Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	
CABEZA	1100	100							
CONCENTRADO	255.3	23.21	16.86	11.18	391.31	259.48	70.49	57.23	4.31
MEDIO	97.8	8.89	10.94	7.45	97.27	66.24	17.52	14.61	
RELAVE	746.9	67.90	0.98	1.88	66.54	127.65	11.99	28.16	

% Recup Au: 88.01

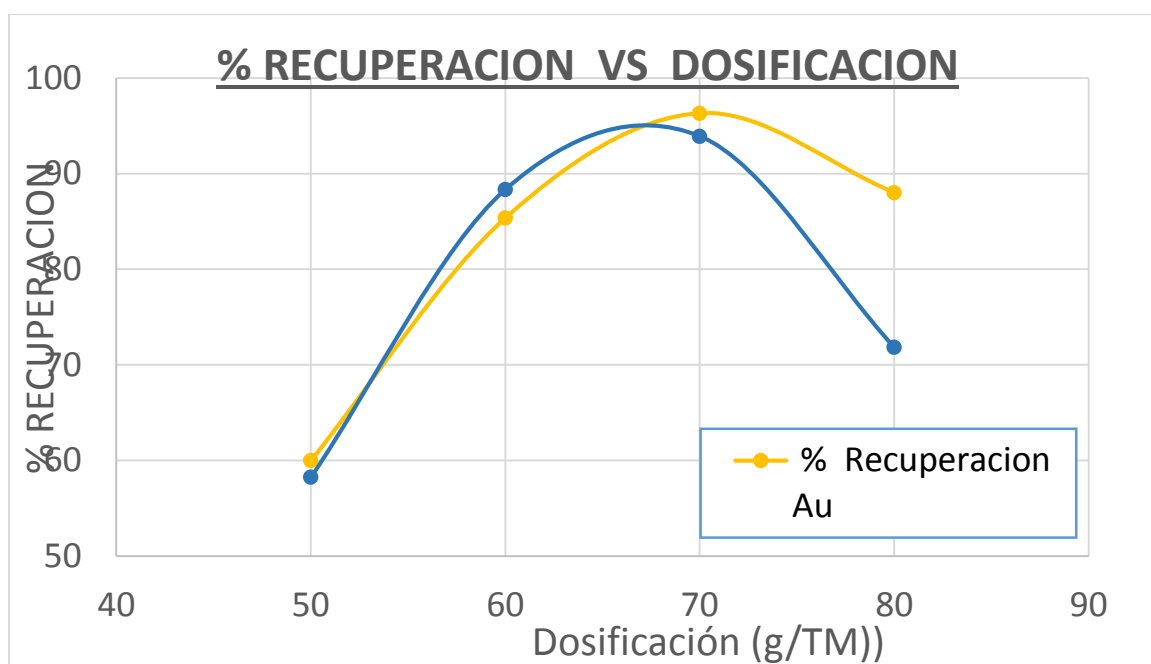
% Recup. Ag: 71.84

* Fuente: elaboración propia

Tabla 18. Porcentaje de Recuperación en función a la dosificación de Z-11

Dosificación (g/TM)	% Recuperación Au	% Recuperación Ag
50	59.99	58.25
60	85.36	88.34
70	96.31	93.91
80	88.01	71.84

Figura 28. Porcentaje de Recuperación en función a la dosificación de Z-11



Fuente: elaboración propia

5.2. Biolixiviación del concentrado de la mejor prueba de flotación, con 70 gr/TM DE Z11

En esta etapa el concentrado fue tratado mediante lixiviación bacteriana, con un cultivo de cepas bacterianas, 9K.

5.2.1 Condiciones de la prueba

Tabla 19. Condiciones de la prueba de biolixiviación.

peso del concentrado	200 g.
agitación (rpm)	150
temperatura °c	20.0
pH	1.8
orp (mv)	570
tiempo de biolixiviación	5, 10, 15 Y 20 días.

* Fuente: elaboración propia

5.2.2. Resultados de la biolixiviación a 5 días

Tabla 20. Balance metalúrgico biolixiviación a 5 días.

PRODUCTOS	PESO(gr) o VOLUMEN	LEY Fe gr/m ³	CONTENIDO FINO	% RECUPERACION
CABEZA	100			100
SOL. RICA	200	119.32	238.64	45.06
RELAVE	100	2.91	291	54.94

* Fuente: elaboración propia

5.2.3. Resultados de la biolixiviación a 10 días

Tabla 21. Balance metalúrgico biolixiviación a 10 días

PRODUCTOS	PESO(gr) o VOLUMEN	LEY Fe gr/m ³	CONTENIDO FINO	% RECUPERACIÓN
CABEZA	100			100
SOL. RICA	200	174.32	348.64	65.33
RELAVE	100	1.85	185	34.67

* Fuente: elaboración propia

5.2.4. Resultados de la biolixiviación a 15 días

Tabla 22. Balance metalúrgico biolixiviación a 15 días.

PRODUCTOS	PESO(gr) o VOLUMEN	LEY Fe gr/m ³	CONTENIDO FINO	% RECUPERACIÓN
CABEZA	100			100
SOL. RICA	200	198.64	397.28	75.20
RELAVE	100	1.31	131	24.80

* Fuente: elaboración propia

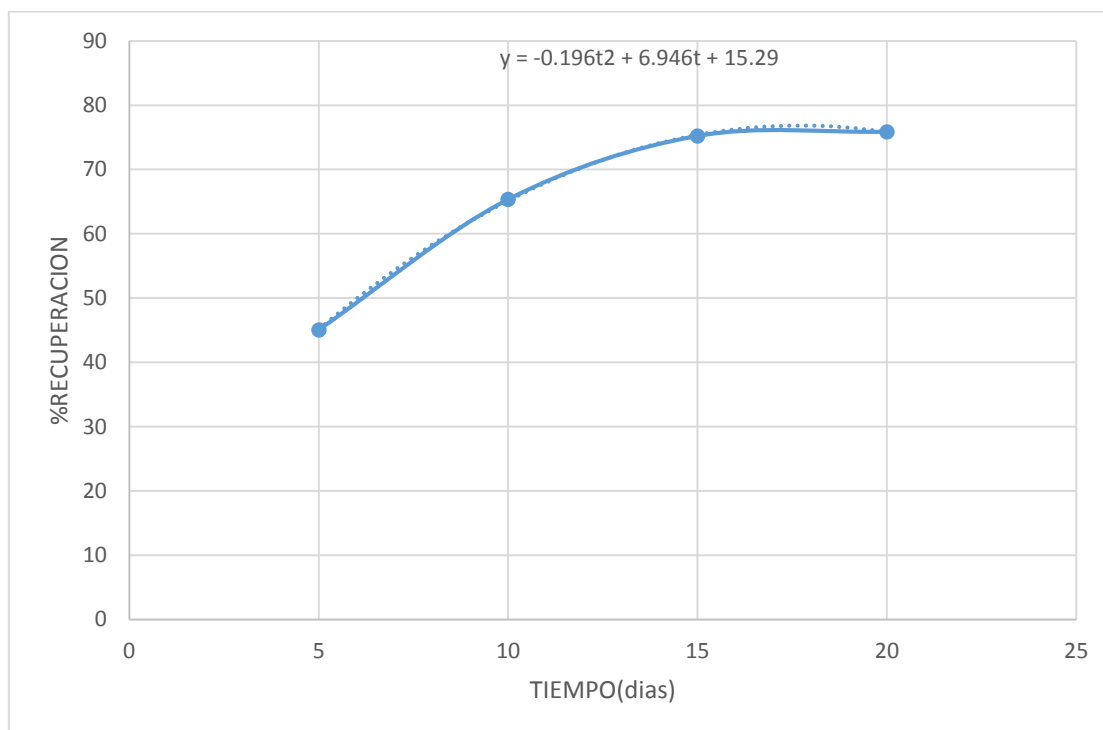
5.2.5. Resultados de la biolixiviación a 20 días

Tabla 23. Balance metalúrgico biolixiviación a 20 días.

PRODUCTOS	PESO(gr) o VOLUMEN	LEY Fe gr/m ³	CONTENIDO FINO	% RECUPERACIÓN
CABEZA	100			100
SOL. RICA	200	201.38	402.76	75.87
RELAVE	100	1.281	128	24.13

* Fuente: elaboración propia

Figura 29. Porcentaje de disolución de Fierro en función al tiempo de biolixiviación



Fuente: Elaboración propia

5.3. Prueba metalúrgica de cianuración

Se realizaron varias pruebas de cianuración a diferentes tiempos, del concentrado con 15 días de biolixiviación, la cual es la mejor prueba.

El concentrado biolixiviado fue remolido hasta una granulometría de 90.1 % - 200m, y con ello se procedió a realizar las pruebas de cianuración en botella a diferentes tiempos (12, 24, 36 y 48 hrs), para ello se trabajó como variable independiente, el tiempo de cianuración y como variable dependiente el porcentaje de recuperación de oro.

En la tabla N° 24 se presentan las condiciones de operación, y en las tablas N° 25, 26, 27 y 28 se presentan los balances metalúrgicos para cada tiempo de cianuración.

5.3.1. Condiciones de la prueba

Tabla 24. Condiciones de la prueba en cianuración

peso de la muestra	300 g.
relacion l/s	2/1
granulometría	90.1% -200 m.
tiempo de cianuración	12, 24, 36 y 48 horas.
ph de cianuración	10.5

*Fuente: elaboración propia

5.3.2. Resultados de la cianuración a 12 horas

Tabla 25. Balance metalúrgico de cianuración a 12 horas

COMPONENTES	PESO O VOLUMEN(ml o g)	LEY(g/TM O mg/lit)		CONTENIDO FINO		%RECUPERACIÓN	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
CABEZA	300						
SOLUCIÓN RICA	600	5.98	7.31	35.88	43.9	61.78	61.53
RELAVE	300	7.4	9.14	22.2	27.4	38.22	38.47
CABEZA CALCULADA		19.36	23.76				

Consumo de NaCN: 3.92 Kg/TM

%Recup. Au: 61.78

Consumo de CaO: 9.55 Kg/TM

%Recup. Ag: 61.53

* Fuente: elaboración propia

5.3.3. Resultados de la cianuración a 24 horas

Tabla 26. Balance metalúrgico de cianuración a 24 horas

COMPONENTES	PESO O VOLUMEN(ml o g)	LEY(g/TM O mg/lit)		CONTENIDO FINO		%RECUPERACIÓN	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
CABEZA	300						
SOLUCIÓN RICA	600	8.98	10.31	53.88	61.9	90.43	87.52
RELAVE	300	1.9	2.94	5.7	8.8	9.57	12.48
CABEZA CALCULADA				59.58	70.7		

Consumo de NaCN: 4.00 Kg/TM

%Recup. Au: 90.43

Consumo de CaO: 9.80 Kg/TM

%Recup. Ag: 87.52

* Fuente: elaboración propia

5.3.4. Resultados de la cianuración a 36 horas

Tabla 27. Balance metalúrgico de cianuración a 36 horas

COMPONENTES	PESO O VOLUMEN(ml o g)	LEY(g/TM O mg/lit)		CONTENIDO FINO		%RECUPERACIÓN	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
CABEZA	300						
SOLUCIÓN RICA	600	9.28	12.18	55.68	73.1	95.38	97.56
RELAVE	300	0.9	0.61	2.7	1.8	4.62	2.44
CABEZA CALCULADA				58.38	74.9		

Consumo de NaCN: 4.15 Kg/TM

% Recup. Au: 95.38

Consumo de CaO: 10.20 Kg/TM

% Recup. Ag: 97.56

* Fuente: elaboración propia

5.3.5. Resultados de la cianuración a 48 horas

Tabla 28. Balance metalúrgico de cianuración a 48 horas

COMPONENTES	PESO O VOLUMEN(ml o g)	LEY(g/TM O mg/lit)		CONTENIDO FINO		%RECUPERACION	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
CABEZA	300						
SOLUCION RICA	600	9.38	12.21	56.28	73.3	95.91	97.64
RELAVE	300	0.8	0.59	2.4	1.8	4.09	2.36
CABEZA CALCULADA				58.68	75.0		

Consumo de NaCN: 4.50 Kg/TM

%Recup. Au: 95.91

Consumo de CaO: 10.40 Kg/TM

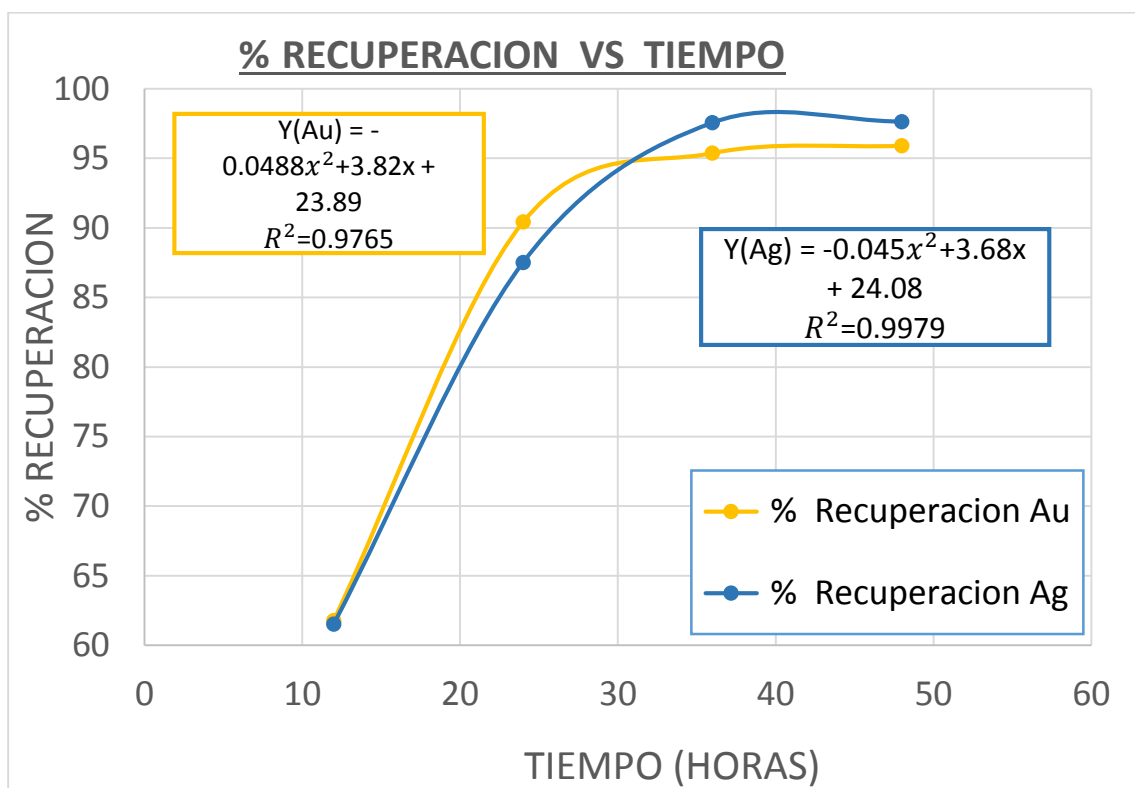
%Recup. Ag: 97.64

* Fuente: elaboración propia

Tabla 29. Porcentaje de recuperación en función al tiempo de cianuración.

Tiempo (horas)	% Recuperación Au	% Recuperacion Ag
12	61.78	61.53
24	90.43	87.52
36	95.38	97.56
48	95.91	97.64

Figura 30. Porcentaje de recuperación en función al tiempo de cianuración.



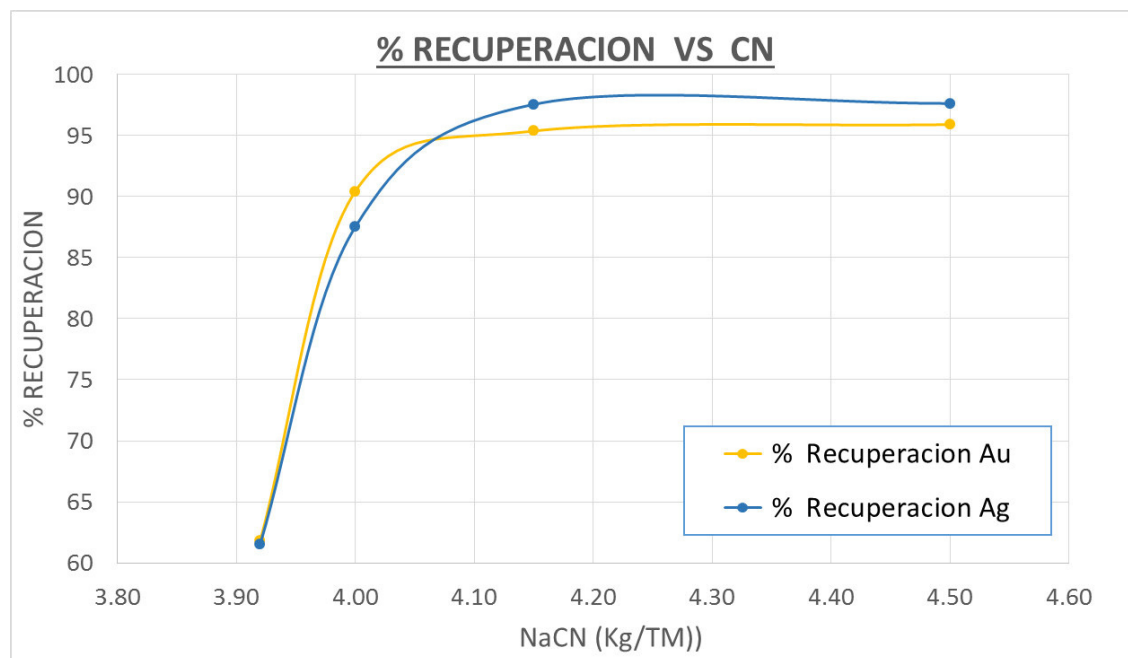
Fuente: elaboración propia

Tabla 30. Porcentaje de recuperación en función del consumo de cianuro

NaCN (Kg/TM)	% Recuperación Au	% Recuperacion Ag
3.92	61.78	61.53
4.00	90.43	87.52
4.15	95.38	97.56
4.50	95.91	97.64

Fuente: elaboración propia

Figura 31. Porcentaje de recuperación en función del consumo de cianuro



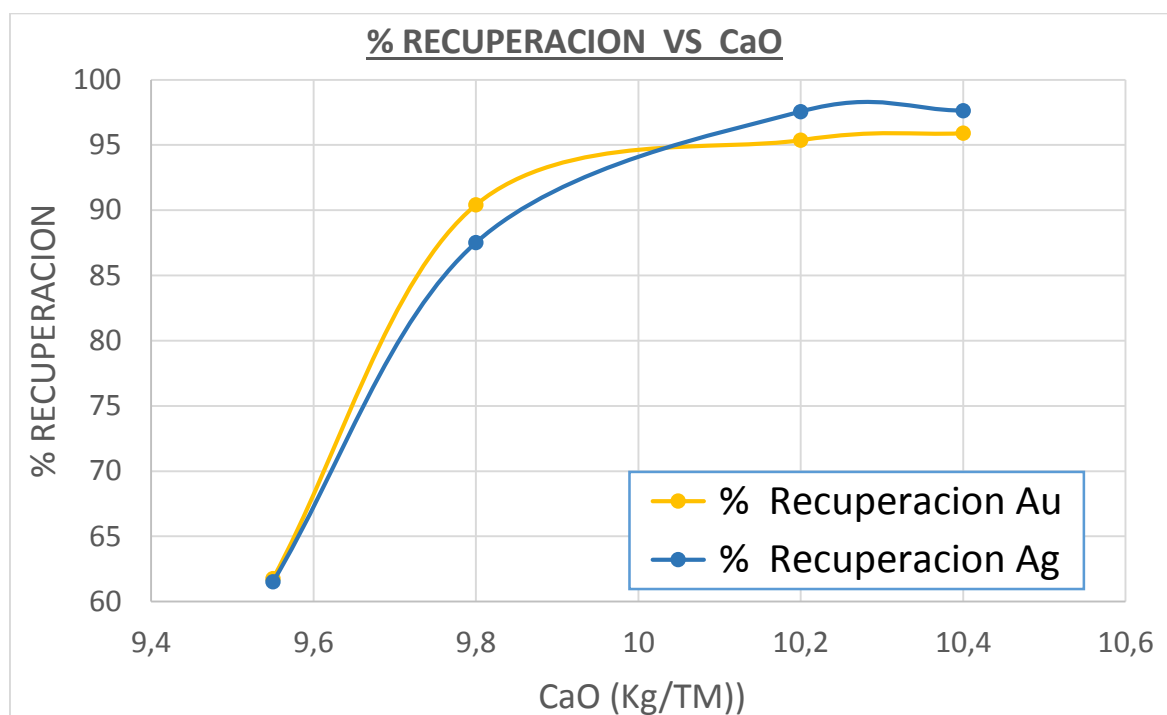
Fuente: elaboración propia

Tabla 31. Porcentaje de Recuperación en función del consumo de Cal (CaO)

CaO (Kg/TM)	% Recuperación Au	% Recuperación Ag
9.55	61.78	61.53
9.80	90.43	87.52
10.20	95.38	97.56
10.40	95.91	97.64

Fuente: elaboración propia

Figura 32. Porcentaje de Recuperación en función del consumo de Cal (CaO)



Fuente: elaboración propia

CAPITULO VI

DISCUSIÓN

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En la etapa de la flotación, previamente son remolidos a una granulometría de 82.5% - 200 malla, la mejor prueba metalúrgica seleccionada fue la tabla 16, donde se obtuvo una calidad del concentrado de 19.72 g/TM de Au y 24.12 g/TM de Ag, recuperación de oro y plata de 96.31%, 93.91% respectivamente, radio de concentración de 4.48, con una dosificación de Z-11.

Tabla 32. Resultados de flotación

DOSIFICACIÓN XANTATO Z-11	LEY Au(g/TM)		% RECUPERACIÓN	LEY Ag(g/TM)		% RECUPERACION
	Concentrado	Relave		Concentrado	Relave	
50	11.93	2.95	59.99	9.3	2.48	58.25
60	18.37	1.15	86.36	21.32	0.98	88.34
70	19.72	0.3	96.31	24.12	0.58	93.91
80	16.86	0.98	88.01	11.18	1.88	71.84

* Fuente: elaboración propia

En la prueba de Biolixiviación del concentrado de la mejor prueba de flotación con 70gr/TM de Z-11, la cual se trabajó con las condiciones de 150 RPM en agitación con un pH 1.8, a tiempos diferentes de 5, 10, 15 y 20 días dando como resultado óptimo en 15 días de biolixiviación degradando el 75.20% de fierro con un cultivo de cepas bacterianas 9K, como indica en la tabla N° 21.

Tabla 33. Resultados de biolixiviación

TIEMPO (días)	DEGRADACIÓN (%)
5	45.06
10	65.33
15	75.20
20	75.87

Fuente: Elaboración propia

En la etapa de la cianuración, previamente son remolidos a una granulometría de 90.1% -200 malla, la mejor prueba seleccionada es la tabla N°26 donde se puede apreciar que dentro de las 36 hrs. para el oro y plata, llegaron a 95.38% y 97.56% de recuperación. Con un consumo de cianuro de 4.15 Kg/TM y 10.20Kg/TM de cal. El tiempo de 48hr, como se puede apreciar en la tabla N°27 las recuperaciones tanto como el oro y la plata se incrementa ligeramente; lo cual ya no justifica dar mayor tiempo de cianuración.

Tabla 34. Resultados de cianuración

TIEMPO (horas)	RECUPERACIÓN (%)	
	Au	Ag
12	61.78	61.53
24	90.43	87.52
36	95.38	97.56
48	95.91	97.64

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

Es posible obtener una recuperación de oro y plata bastante aceptable con los procesos de flotación – biolixiviación y cianuración para relaves de concentrados de cianuración refractarios en el distrito de Calpa.

Los resultados de la caracterización de la muestra del mineral estudiado indicó un tipo de oro refractario que no pudo ser observado al igual que la plata, así mismo se observó la presencia de especies mineralógicas como: calcopirita, Covelita, esfalerita, ilmenita, pirita, hematita, pirrotita, pirolusita, psilomelano goethita y gangas.

Los tipos geométricos de entrelazamientos de las especies mineralógicas observados en la caracterización indicaron que los enlaces referidos al oro y la plata no son posibles de liberar mediante procesos de conminución.

La mejor prueba de flotación se realizó con una dosificación de 70 gr/TM de xantato Z-11, como variable independiente, obteniéndose una calidad de concentrado de 19.72 gr/TM, y 96.31% de recuperación de oro y 24.72gr/TM con 93.91% de recuperación para la plata, con un radio de concentración de 4.48.

Remoliendo el concentrado biolixiviado a una granulometría de 90.1% - 200m, con 36 horas de cianuración, se obtiene una recuperación de 95.38 % de oro y 97.56% de Ag.

El tratamiento adecuado de acuerdo a los resultados de la investigación de la tesis, para la recuperación de oro y plata a partir de relaves de cianuración de concentrados refractarios en el

distrito de Calpa, es una flotación del relave, seguido de una biolixiviación del concentrado de flotación y por último remoler el concentrado biolixiviado para cianurar 36 horas para obtener una recuperación total de 95.38 % de oro y 97.56% de Ag. Como variable dependiente.

RECOMENDACIONES:

1. Se recomienda que el proceso metalúrgico estudiado en esta investigación sirva como tratamiento alternativo para recuperar oro y plata a partir de relaves refractarios en el distrito de calpa y promover así el procesamiento de relaves que actualmente son abandonados debido a que los resultados metalúrgicos no son alentadores por su naturaleza.
2. Se recomienda realizar pruebas a nivel pilotaje, con los resultados obtenidos de la presente tesis, realizando el escalamiento de las variables para un proceso continuo.
3. Evaluar reactivos específicos como los colectores en el proceso de flotación para la mejor recuperación de oro y plata refractario.
4. Estudiar diferentes granulometrías, en la tabla de biolixiviación de relaves de concentrados de cianurados, para disminuir el tiempo de lixiviación de las bacterias.
5. Realizar pruebas metalúrgicas con otros agentes lixiviantes en remplazo del cianuro, porque se tiene la escencia que el NaCN no es amigable con el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Pianto T. (1986) Tesis para optar el título de Ing. Metalúrgico “Recuperación de oro y plata a partir de Minerales Auríferos que contienen Arsenopirita y Pirrotitas, por los métodos de Cianuración y Lixiviación Ácida Thiourea”. UNMSM.
2. Sandoval G. y Robles J. (1997) Tesis para optar el título de Ing. Metalúrgico “Investigación del proceso de Bio-Lixiviación de sulfuros refractarios. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
3. Aramburu Sixto. (2003) Modelo de la Preaireación En Concentrado De Oro Pirítico, Para La Optimización Del Proceso De Cianuración- Revista del Instituto de Investigación FIGMMG Vol. 6, Núm. 12 Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
4. Guillermo Zabaleta, Alonso (2000). *El oro: comercio, obtención y aplicaciones*. 2nd ed. Madrid, España: Sociedad Española de Metales Preciosos. 184 p.
5. Gomis M., Rosa; Noguera G., Gabriel (2012). *Análisis del mercado del oro: Variables relevantes y modelo de estimación del precio*. Barcelona, España: Universidad Pompeu Fabra. 86 p.
6. Marsden, John; House, Lain. (1960) *The Chemistry of Gold Extraction*. 2nd ed. Colorado, EE.UU: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. 350 p.
7. Luna Córdova, Henry. (2016) Desarrollo de la Minería Aurífera y Argentífera en el Perú. *Desde Adentro*, 152. pp.41-50.
8. Declaración Estadística Mensual (ESTAMIN) - Ministerio de Energía y Minas (MINEM)- 2018.
9. Flores Florencio (2015) Estudio metalúrgico para la recuperación de plata y oro en minerales polimetálicos. Tesis de grado Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

10. Marsden, John; House, Lain. (1960) *The Chemistry of Gold Extraction*. 2nd ed. Colorado, EE.UU: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. 350 p.

11. Astucuri, Venancio. (1982) *Fundamentos y aplicaciones principales de la flotación de minerales*. Lima, Perú: Colección ciencias. 403 p.

12. Vilcapoma Juño, Johnnathan; Chávez Poma, Zamudio (2012). *Pruebas experimentales a nivel de laboratorio de concentración gravimétrica y flotación de minerales de oro en la planta concentradora Caselita en Condoroma - Cuzco*. Tesis (Ingeniero Metalurgista y de Materiales). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. 93 p.

13. Viñas R. Aranibar A. (2006) *Tecnologías limpias en las industrias extractivas minero metalúrgico*. CETEM.

14. Dominic Mihovilovic, Esteban; Sánchez F., Mario; Correa C., Héctor. (2006) *Manual General de Minería y Metalurgia*. Santiago, Chile: Portal Minero Ediciones. 403 p.

15. Espí, J.A. (2001) *El libro de la minería de oro en Iberoamérica, Monterreina*. Madrid, España: Portal Español. p. 130-132.

16. Misari Ch., Fidel Sergio; Franco Jiménez, Juan Antonio. (1993) *Metalurgia del Oro*. Lima, Perú: Centros de estudios y promoción en ciencias de la tierra. Vol. 2.

17. Palomino A.; Ramos O. (2008) *Tesis Evaluación de la recuperación de oro y plata a partir de minerales sulfurados en una matriz de cuarzo – Minera Koricolqui*. Presentada en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

18. Hurtado H. (2003) *Oro oculto en el Perú*. Editorial UNAS. Lima.

19. Barsky, G; Swainson, S; Hedley, N. (1934) *Disolución de oro y plata en soluciones cianuradas*. Trans. AIME 112, (1934), 677 p.
20. *Biolixiviación del cobre en minerales sulfurados refractarios como proceso preliminar para la lixiviación de oro por cianuración*, grado de Ingeniero Químico, Luis Ramírez Osco. 2015.
21. Díaz D. y Condori I. (2015) Tesis para optar el título de Ing. Químico, “*proceso de detoxificación de soluciones cianuradas usando el metodo inco en efluentes mineros*” –
22. Ministerio de Ambiente del Perú - *DECRETO SUPREMO N° 010-2010-MINAM010*.

ANEXOS

Foto 1: Molino de bolas



Foto 2: Toma de muestras y control de la concentración de cianuro libre



Foto 3: Flotación de pirita.



Foto 4: Cuarteo y Muestreo



Foto 5: Granulometría 100% - 10m



Foto 6: Sedimentándose después del lavado



Foto 7: Pruebas de Biolixiviación



Foto 8: Conteo bacteriano - Biolixiviación



Tipos geométricos de intercrecimientos entre minerales

TIPOS GEOMETRICOS DE INTERCRECIMIENTOS ENTRE MINERALES											
POSIBILIDADES DE LIBERACION COMPLETA											
MALLAS < 150											
	I	II	III	IV	LIBERACION		I	II	III	IV	LIBERACION
1a SIMPLE					FACIL	2d COLOFORME					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE
1b AMEBOIDE					MODERADAMENTE FACIL	3a SANDWICH					MODERADAMENTE FACIL A DIFICIL
1c GRAFICO					IMPOSIBLE	3b ESTRATIFICADO					IMPOSIBLE
1d DISEMINADO					IMPOSIBLE	3c RETICULAR					IMPOSIBLE
1e INCLUSION					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE	3d VETEADO					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE
2a CORONA					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE	4a BORDE COMPUESTO					MUY DIFICIL
2b SUB-CORONA					MUY DIFICIL	4b COMPENETRACION					MODERADAMENTE DIFICIL
2c CONCENTRICO					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE	4c INTERSTICIAL					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE

Fuente Gagliuffi Espinoza, Pedro M. (2018)

**LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE
ACTIVIDADES MINERO - METALÚRGICAS**

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el Promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0,8
Arsénico Total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente(*)	mg/L	0,1	0,08
Cobre Total	mg/L	0,5	0,4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1,6
Plomo Total	mg/L	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/L	1,5	1,2

(*) En muestra no filtrada

- Los valores indicados en la columna "Límite en cualquier momento" son aplicables a cualquier muestra colectada por el Titular Minero, el Ente Fiscalizador o la Autoridad Competente, siempre que el muestreo y análisis hayan sido realizados de conformidad con el Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes del Ministerio de Energía y Minas; en este Protocolo se establecerán entre otros aspectos, los niveles de precisión, exactitud y límites de detección del método utilizado.

- Los valores indicados en la columna "Promedio anual" se aplican al promedio aritmético de todas las muestras colectadas durante el último año calendario previo a la fecha de referencia, incluyendo las muestras recolectadas por el Titular Minero y por el Ente Fiscalizador siempre que éstas hayan sido recolectadas y analizadas de conformidad con el Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes del Ministerio de Energía y Minas

Fuente: Ministerio de Ambiente del Perú - DECRETO SUPREMO N° 010-2010-MINAM010.

REPORTES QUIMICOS



LABORATORIOS S.A.C
DESDE 1999

*Análisis químico de minerales, concentrados,
aleaciones, agua, aire.
Control ambiental
Fabricación y venta de reactivos químicos*

REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO

Solicitante : **HILTON CHILON**
Tipo de Muestra : Muestra mineral
Procedencia :
Fecha de Recepción : 28 de Abril del 2017
Referencia : H&F 890/2017

Denominación de muestra:	RESULTADOS DE ANALISIS
	Au Oz/TC
CONC. Au	0.348
MEDIO Au	0.336
RELAVE Au	0.086

Lima, 03 de Abril del 2017

Oficina: Av. Colonial N°1583-Lima Tel: 334-4562/425-6179/989067984 E-mail: hventas@hyflaboratorio.com
Laboratorio: Mz. E5 Lt. 6 Parque Industrial Pachacutec – Ventanilla
Página web: <http://www.hyflaboratorio.com/>

Fuente: H&F Laboratorios SAC.



LABORATORIOS S.A.C
DESDE 1999

*Análisis químico de minerales, concentrados,
aleaciones, agua, aire.
Control ambiental
Fabricación y venta de reactivos químicos*

REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO

Solicitante : HILTON CHILON
Tipo de Muestra : Mineral
Procedencia :
Fecha de Recepción : 02 de Junio del 2017
Referencia : H&F 1204-1205/2017

Denominación de Muestra	RESULTADOS DE ANÁLISIS			
	Ag Oz/TC	Ag mg/L	Au Oz/TC	Au mg/L
RELAVE	0.12	-	0.185	-
SOLUCION	-	3.74	-	1.78

Lima, 08 de Junio del 2017

Oficina: Av. Colonial N°1583-Lima Tel: 334-4562/425-6179/989067984 E-mail: hfventas@hyflaboratorio.com
Laboratorio: Mz. E5 Lt. 6 Parque Industrial Pachacutec – Ventanilla
Página web: <http://www.hyflaboratorio.com/>

Fuente: H&F Laboratorios SAC.



LABORATORIOS S.A.C
DESDE 1999

*Análisis químico de minerales, concentrados,
aleaciones, agua, aire.
Control ambiental
Fabricación y venta de reactivos químicos*

REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO

Solicitante : HILTON CHILON
Tipo de Muestra : Mineral
Procedencia :
Fecha de Recepción : 02 de Junio del 2017
Referencia : H&F 1204-1205/2017

Denominación de Muestra	RESULTADOS DE ANÁLISIS			
	Ag Oz/TC	Ag g/TM	Au Oz/TC	Au g/TM
CABEZA	0.22	6.8	0.23	7.2

Lima, 08 de Junio del 2017

Fuente: H&F Laboratorios SAC.



LABORATORIOS S.A.C
DESDE 1999

*Análisis químico de minerales, concentrados,
aleaciones, agua, aire.
Control ambiental
Fabricación y venta de reactivos químicos*

REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO

Solicitante : HILTON CHILON
Tipo de Muestra : Muestra mineral
Procedencia :
Fecha de Recepción : 26 de Setiembre del 2017
Referencia : H&F 2576-2579/2017

Denominación de muestra:	RESULTADOS DE ANALISIS	
	As mg/L	Fe mg/L
2 g/L	0.05	657
5 g/L	0.18	668
1 g/L	0.41	605
10 g/L	0.24	805

Lima, 02 de Octubre del 2017

H&F LABORATORIOS SAC
SERVICIOS ANALITICOS
[Firma]
ALBINO HUAYTALLA H.
GERENTE GENERAL

Oficina: Av. Colonial N°1583-Lima Tel: 334-4562/425-6179/989067984 E-mail: hventas@hyflaboratorio.com
Laboratorio: Mz. E5 Lt. 6 Parque Industrial Pachacutec – Ventanilla
Página web: <http://www.hyflaboratorio.com/>

Fuente: H&F Laboratorios SAC.